



世界资源研究所
WORLD RESOURCES INSTITUTE

ISSUE BRIEF

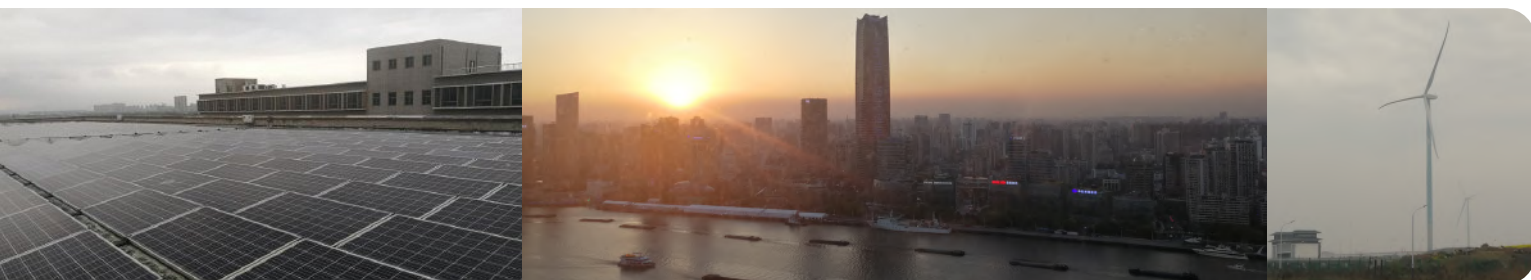
长三角地区分布式可再生能源发展潜力及愿景

POTENTIAL AND VISION OF DISTRIBUTED RENEWABLE
ENERGY IN YANGTZE RIVER DELTA REGION

WRI.ORG.CN

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM



目录

摘要	2
Executive Summary	3
前言	4
分布式清洁能源：长三角地区能源转型的战略选择	5
分布式清洁能源发展的国际经验	8
长三角地区分布式可再生能源发展的实践基础	12
长三角地区分布式可再生能源发展潜力评估	18
长三角地区分布式能源发展愿景	26
长三角地区分布式能源发展面临的问题挑战和政策建议	30
注释	32
参考文献	33
致谢	34
课题组成员	34
关于世界资源研究所	35

执行摘要

中国在2020年9月的第七十五届联合国大会一般性辩论上提出了“努力争取2060年前实现碳中和”的长期气候目标，随后在12月的气候雄心峰会宣布了多个更新的2030年国家自主贡献目标，包括“到2030年，非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右，风电、太阳能发电总装机容量将达到12亿千瓦以上”。这些目标的提出，不仅提振了全球应对气候变化的信心，也为国内低碳转型指明了方向。

全球能源部门的温室气体排放占排放总量的73%，因此，能源系统的深度减排是实现全球应对气候变化目标的关键。当下全球正在加速由化石能源向可再生能源¹转型，随着可再生能源的技术进步和成本下降，分布式清洁能源正成为能源转型的一个重要组成部分。长江三角洲地区（以下简称“长三角地区”或“长三角”）人口和产业聚集，能源消费目前呈现出总量大、结构高碳等特征。要推动长三角地区高质量发展，必须以绿色发展为引领，就近开发利用可再生能源，构建清洁、低碳、安全、高效的现代能源体系。

在全球范围内，分散式风电和分布式光伏是两种主流的可再生能源分布式应用模式。分散式风电在欧洲兴起，特别是丹麦和德国，技术和商业模式都臻于成熟。截至2018年底，丹麦接入20千伏及以下电压等级配网的风电装机占比达80%以上²，德国90%以上的陆上风电场装机数量少于9台，主要接入36千伏或110千伏配电网。分散式风电在丹麦、德国的成功，主要得益于高度灵活的电网系统和完善的电力交易市场，以及和能源转型相配合的电力体制改革。此外，居民参与度高、成本较低、收益多样的社区风电项目也是丹麦和德国风电发展的一大亮点。在德国，分布式光伏的发展同样全球领先。为了扶持小规模光伏项目，德国政府对装机规模在100千瓦以下的光伏项目保留20年的固定电价补贴。小型光伏项目可以通过政策性银行的低息贷款来降低融资成本。另外，政府还对配套的储能设施提供额外补贴，鼓励居民自发自用。

长三角地区是我国分布式能源发展较好的地区。截至2019年底，江苏、浙江、上海²共计开发分布式光伏1693万千瓦，是我国分布式光伏的主要发展地区；分散式风电也从这里起步。本研究对江苏、浙江和上海的分布式可再生能源发展潜力评估分为三个方面：分布式光伏开发潜力、分散式风电开发潜力和电网对分布式电源的承载力。对分布式光伏开发潜力的评估采用了分场景集成和参照海宁模式两种测算方法，结果显示，两省一市的分布式光伏装机潜力可达1.8亿~2亿千瓦。在风电方面，技术可开发量、农村和园区情景集成以及参考德国装机密度三种评估方式综合显示，分散式风电开发潜力约为3261万~8268万千瓦。两省一市分布式光伏和分散式风电就可满足到2035年新增电力需求的48%~69%。但在现有的配网结构和运行模式下，该地区分布式电源接入电网的承载力远小于开发潜力，需要尽快加强配网建设，优化调度运行体系。

基于潜力评估的结果以及对未来用电需求的研判，报告还初步描绘了江浙沪地区分布式可再生能源的发展愿景。“十四五”期间，将大力发展分布式清洁能源作为长三角地区能源转型和经济发展的方向，率先突破体制机制等方面的障碍，探索分布式能源与储能、电动汽车等负荷侧资源相结合的综合能源系统发展新模式，通过建立完善的技术标准体系、创新商业模式、规范项目管理和简化项目程序等手段，实现千家万户就近开发利用分布式清洁能源的新局面，争取在2025年实现分布式可再生能源发电装机规模达到5000万~7000万千瓦。2025年之后，电网系统灵活性进一步提升，电力市场机制逐步健全，商业模式日趋成熟，分布式清洁能源进入规模化和高质量发展阶段。到2035年，该地区分布式发电装机规模接近3亿千瓦。

虽然长三角地区分布式能源发展取得了一定成就，但与开发潜力相比，开发规模还远远不够，仍面临着诸多问题。比如，分布式光伏收益不稳定性较大、分布式市场化交易存在壁垒、分散式风电前期手续过于繁琐等。针对以上问题，结合长三角地区的能源总量控制、节能减排考核等要求，本研究提出相应的政策建议：将市场化交易作为推进分布式清洁能源发展的主要抓手；进一步简化项目审批流程，为分散式风电发展打通“绿色通道”；创新多样化分布式清洁能源发展模式及融资模式，推动分布式能源带动周边社区及园区共同绿色发展，实现共享利益。

EXECUTIVE SUMMARY

At the General Debate of the 75th Session of the United Nations General Assembly in September 2020, China announced that it aimed to achieve carbon neutrality before 2060. In the subsequent Climate Ambition Summit in December, China announced some further commitments for 2030 Nationally Determined

Contributions (NDCs), including increasing the share of non-fossil fuels in primary energy consumption to around 25 percent and bring its total installed capacity of wind and solar power to over 1.2 billion kilowatts. These goals have not only boosted global confidence in addressing climate change, but also pointed out the direction for domestic low-carbon transformation.

The greenhouse gas emissions from the global energy sector account for 73% of the total emissions. Therefore, deep emission mitigation in energy sector is crucial for achieving climate goals. As the technology of renewable energy improves and its cost falls, distributed clean energy is becoming a significant part of the energy transition. The Yangtze River Delta region encompasses intensive industries and a large population. The energy consumption there presents characteristics of a big total volume and carbon intensive structure. The high-quality development of the Yangtze River Delta means a transit toward the green and low carbon economy, which must be powered by a clean, low-carbon, safe, and efficient energy system, and maximize the development and utilization of local renewable energy.

On a global scale, decentralized wind power and distributed solar PV are two main application modes of distributed renewable energy. Decentralized wind power emerged in Europe, especially in Denmark and Germany where technology and business modes have been mature. As of the end of 2018, wind power in Denmark connected to the distribution network with voltage of 20kV and below accounted for over 80%, and in Germany, over 90% of onshore wind farms has less than 9 wind turbines, mainly connected to the distribution network of 36kV or 110kV. The success of decentralized wind power in Denmark and Germany mainly relies on a flexible power grid system and a mature power trading market. In addition, Denmark and Germany have rich experience on community wind projects, especially on engaging residents, lowering costs, and diversifying returns. Germany also leads the world in distributed solar PV. In order to support small-scale PV projects, the German government retains a 20-year fixed subsidy for PV projects with installed capacity below 100 kW. Policy banks also provide small-scale PV projects with low-interest loans to reduce financing costs. Moreover, the government offers additional subsidies to matched energy storage facilities to encourage self-consumption of distributed solar power.

Distributed renewable energy developed well in the Yangtze River Delta region. Until the end of 2019, the total amount of distributed solar PV developed in Jiangsu, Zhejiang, and Shanghai was up to 16.9 GW. This region is also the place where decentralized wind power begins to develop in China. In this study, the team evaluated the development potential of distributed solar PV and decentralized wind power, as well as the adoption capacity of the grid. For distributed solar PV potential analysis, we aggregated the development potential of different scenarios, such as industrial/commercial/residential rooftop solar, solar PV plus agriculture/fishery. It shows that the potential installed capacity of distributed solar PV in this region can reach 180 GW to 200 GW. In terms of decentralized wind power, we did the potential assessment based on wind resource and land availability, we also aggregated the potential in different application models including industrial parks and villages. The result shows that the development potential of decentralized wind power will be 32.6GW to 82.7GW. In that region, distributed solar PV and decentralized wind power together can meet 48% to 69% of the incremental energy demand by 2035. However, under the existing distribution network structure and the operating mode, the adoption capacity of distributed system in this region is much less than its development potential. Thus, it is necessary to strengthen the construction of distribution network and optimize the dispatching and operating system as soon as possible.

Based on the results of the potential assessment as well as the analysis on future energy demand, this report draws a preliminary development vision of the distributed renewable energy in Jiangsu, Zhejiang, and Shanghai.

- During the 14th Five-Years (2021-2025), prioritize distributed renewable energy as a key strategy of energy transition and economic development in the Yangtze River Delta region. It is expected to achieve 50-70 GW installed capacity of distributed renewable energy by 2025 if the following measures could be taken: breaking through barriers in institutional mechanism; exploring creative models of energy integration systems, such as the integration of distributed renewable energy and energy storage, electric vehicle, and other demand-side resources; establishing a series of technical standards; improving project management

and simplifying project approval procedures, motivating thousands of households to develop and utilize distributed renewable energy nearby.

- After 2025, the flexibility of the power grid system will be further improved, the power market and business models are more matured. Distributed renewable energy will enter the stage of scaling up. By 2035, the installed capacity of distributed renewable energy in this region will reach 300 GW.

Although certain achievements have been made in the development of distributed renewable energy in the Yangtze River Delta region, the development scale is far more enough compared with its development potential. There are still problems such as unstable returns of distributed solar PV, barriers in distributed energy peer-to-peer trading, and complicated approval process of decentralized wind power. Based on these problems analysis, considering the requirements of total energy control, renewable energy consumption obligation, and GHG emissions intensity targets in the Yangtze River Delta region, this study proposes the following policy recommendations: distributed energy trading should be an entry point for promoting the development of distributed renewable energy; further simplify the project approval process for decentralized wind power; innovate and diversify developing models and financing models of distributed renewable energy; promote distributed renewable energy in communities and industrial parks and share benefits together.

前言

项目背景

随着能源、环境及气候变化问题日益凸显，提高能源利用效率、优先开发利用可再生能源成为各国加快能源转型、实现能源可持续发展的共同选择。与此同时，随着分散式风电、分布式光伏、储能、智能电网等技术的发展，分布式能源的经济性和灵活性优势逐步显现，可以就近满足用户的负荷需求，使得“电从身边来”成为可能。中国的能源发展规划也强调可再生能源集中式开发与分散式利用并举，优化开发布局，因地制宜发展分布式能源。

长三角地区是中国经济最发达、能源消费最集中的区域之一。由于缺乏传统能源资源，长三角地区的能源供给高度依赖其他省份的输入，煤电装机比重居高不下。随着经济规模的进一步

扩大，该地区能源总量和能耗强度的双控压力越来越大，能源转型尤为迫切。长三角地区发展可再生能源的潜力还有多大？分布式可再生能源发展还存在哪些问题和挑战？需要什么样的政策支持措施？社会各界迫切需要在这些问题上找到答案。

在能源基金会的支持下，世界资源研究所与中国宏观经济研究院能源研究所联合开展了长三角地区分布式清洁能源发展潜力及愿景课题研究。本报告预期的作用是地方“十四五”能源规划提供决策参考，将分布式可再生能源作为“十四五”期间能源转型的重要抓手，并且通过政策优化和机制创新为分布式可再生能源的发展提供良好的市场环境。

研究方法

课题组通过文献研究等方式，分析了江苏、浙江和上海的能量供给现状；采用卫星图片数据识别了工商业建筑面积，并结合居住建筑面积统计数据、农业大棚数据、水域养殖面积统计数据，评估了两省一市屋顶光伏和“光伏+农业/渔业”的开发潜力；综合考虑风资源数据和土地可获得性，评估了分散式风电的技术开发潜力，并对园区和农村两种应用场景进行了测算；基于当前的配网架构和调度运行方式，对分布式电源接入电网的承载力进行了量化评估；通过实地调研、利益相关方座谈等方式，考察了分布式光伏和分散式风电的典型应用模式，并识别出分布式可再生能源发展面临的关键挑战，提出了相应的政策建议；采用计量经济学模型，对两省一市未来的能源电力需求做出了分析预测；并结合需求增长趋势，提出了中远期分布式可再生能源的发展愿景。

报告结构

本报告分为六个部分。

- 第一部分介绍了分布式清洁能源的特征与技术类型，明确本研究的边界。从长三角地区的发展定位和能源供给现状识别在该地区发展分布式清洁能源的战略机遇。
- 第二部分梳理了分布式可再生能源在丹麦和德国的发展模式和成功经验。
- 第三部分分享了课题组在实地调研过程中考察的典型案例，包括工业/商业屋顶光伏、居民屋顶光伏、园区分散式风电以及农村分散式风电，并进一步说明了分布式能源发展的技术基础和经济性条件。
- 第四部分评估了分布式光伏和分散式风电在江苏、浙江和上海的开发潜力，以及分布式电源接入当地电网的承载力。
- 第五部分基于潜力评估结果和未来电力需求的初步预测，提出了分布式可再生能源发展的愿景。

- 第六部分在文献调研、项目调研、利益相关方座谈、专家访谈的基础上，梳理了分布式可再生能源发展面临的挑战，提出了政策建议。

分布式清洁能源： 长三角地区能源转型的战略选择

分布式清洁能源的定义与特征

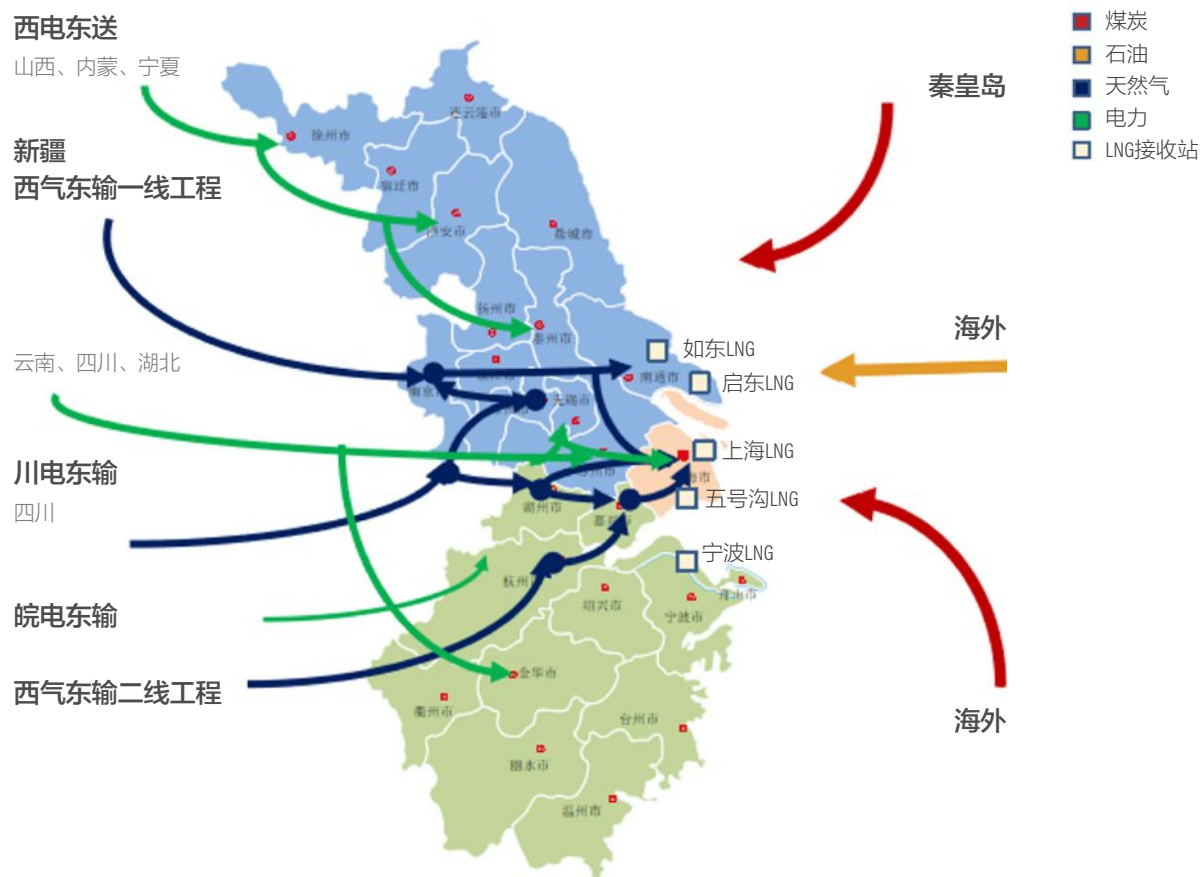
国际上对于分布式清洁能源的定义并没有统一的表述，所涵盖的边界也不完全一致。一般的表述强调其本地性（靠近负荷，就近消纳），装机规模相对较小，可利用的技术包括分布式天然气（冷）热电联供、生物质热电联产、小型水电、太阳能、风能等发电技术，以及其中几类技术（包括储能）集成的多能互补应用模式。

与传统能源的集中式供应模式相比，分布式能源具有以下特征：一是能源利用效率高。分布式能源靠近用户端，减少了电力生产和运输过程的损耗。在多能互补的系统中，可实现能源梯级利用，提升系统效率。二是供能灵活。传统能源的集中式供能调节能力有限，在城市用电峰谷差越来越大的现实情况下，为了满足短时间的尖峰负荷而增加化石能源装机容量，然而利用小时数逐年走低，使得投资的经济性越来越差。而分布式能源系统尤其是与储能相结合的系统可以根据电源的出力特性和用户的负荷需求来匹配供需。三是经济可行。分布式能源系统无须建设输变电设施和长距离的管道，减少投资成本和维护成本，投资门槛相对较低，更易于撬动社会资本的投入。四是环境友好。随着可再生能源开发利用技术的不断成熟，以光伏为代表的可再生能源已成为分布式能源系统的重要元素，相较于传统化石能源的燃烧，大大减少了污染物排放。此外，随着废弃物资源能源化利用技术和商业模式创新，厨余垃圾、市政污泥等有机废弃物的能源价值得到挖掘，协同处置这些有机废弃物也使得城市和乡村的环境面貌大为改观。

分布式天然气（冷）热电联供也是重要的分布式能源，但由于分布式天然气多联供发展与本地的能源资源禀赋关系不大，且面临着热冷负荷匹配难、项目经济性较差、空间布局要求高等挑战，需要根据用户的冷、热、电负荷做相应的规划布局。此外，城市固体废弃物处理是城镇化发展的刚性要求，近年来城市废弃物资源化利用发展很快，这类项目发展的最主要动力是城市垃圾减量化发展，能源产出是辅助效益。因此，本文重点讨论了长三角地区分布式光伏及分散式风电应用的潜力，主要考虑了当地清洁能源资源的开发利用：

- 分布式光伏：在用户所在场地或附近建设运行，以用户侧自发自用为主、多余电量上网且在配电网系统平衡调节为特征的光伏发电设施。

江浙沪是中国一次能源调运的主要目的地之一



■ 分散式风电：位于用电负荷中心附近，在低电压等级的配网内分散接入，所产生的电力在配网内就近消纳的风电项目。

长三角地区能源供给现状

长三角地区是中国经济最活跃、开放程度最高、创新能力最强的区域之一。其中，江浙沪两省一市的地区生产总值占全国的1/5，人口总数占全国的11.6%³。

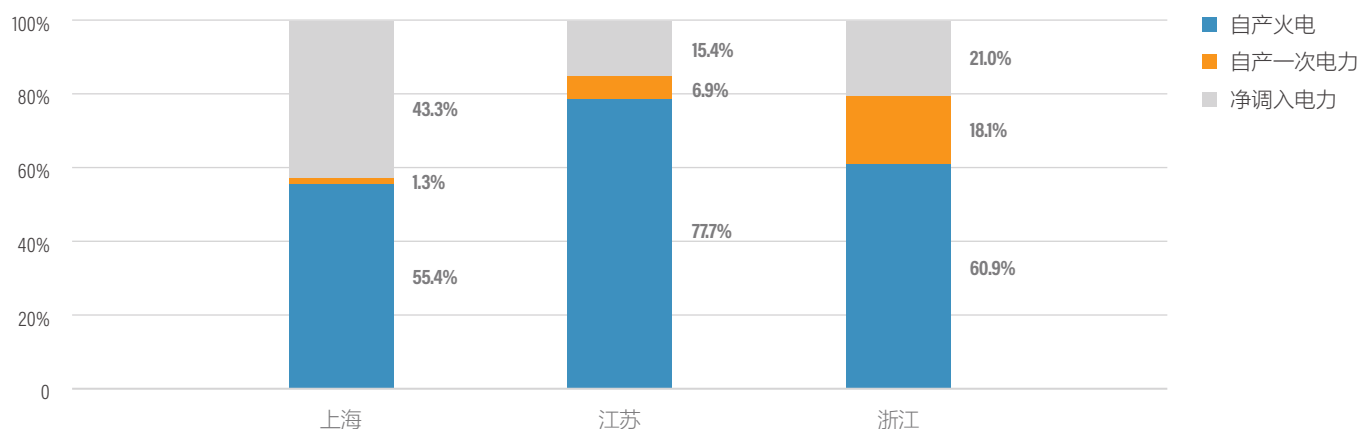
长三角地区也是中国能源消费最集中的区域之一。这一区域传统能源资源匮乏，是中国“北煤南运”、“西气东输”和“西电东送”等跨省跨区重大能源基础工程的主要目的地（见图1）。

2018年，江浙沪两省一市的能源消费总量为6.5亿吨标准煤，约占全国的15%，人均能源消费均高于全国平均水平（3.3

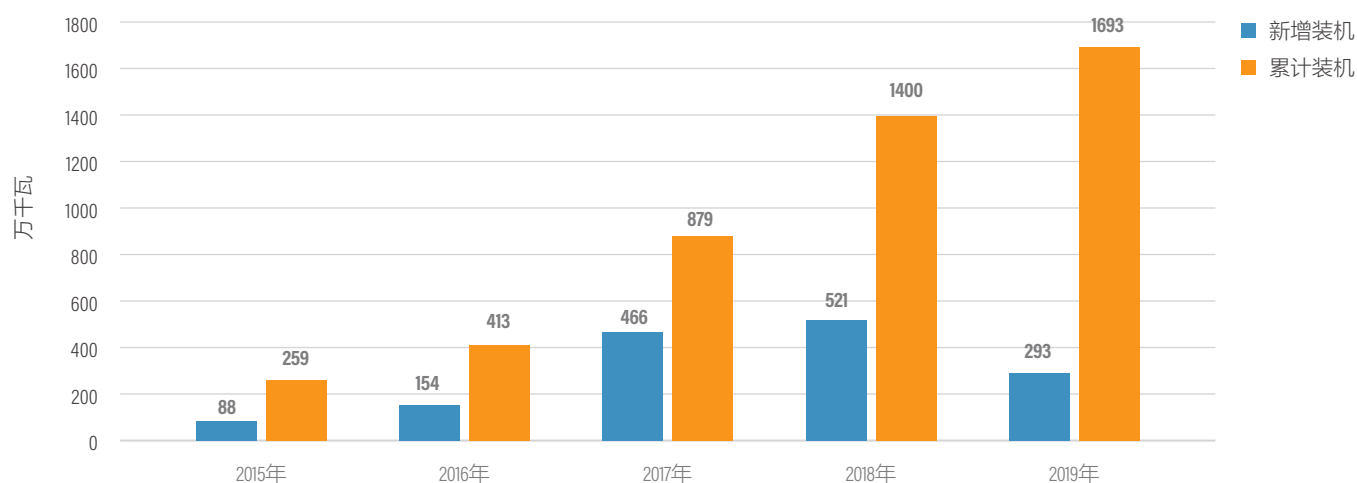
吨标准煤/人），其中江苏为3.9吨标准煤/人，浙江为3.7吨标准煤/人，上海为4.9吨标准煤/人。2018年，江浙沪两省一市的全社会用电量超过1.2万亿千瓦时，占全国的18%⁴，人均电力消费量是全国平均水平的1.5倍。长三角地区的能源发展具有需求总量大、化石能源比重高、对外依赖性强等特点，在能源低碳发展、保障能源安全等方面压力较大。

从能源消费结构来看，江浙沪地区仍以化石能源为主，两省一市的煤炭消耗量占能源消费总量的比重仍在50%以上。2017年，火电在两省一市电力装机容量中占78.3%，核电占3.8%，水电、风电和太阳能发电分别占6.3%、3.8%和7.8%ⁱⁱⁱ。电力消费以本地自产火电为主，自产一次电力（包括可再生电力和核电）除了浙江达到18.1%之外，江苏和上海都不到10%。上海对外调电力的需求超过40%，江苏和浙江的净调入电力占比分别是15.4%和21.0%（见图2）。

2

江浙沪地区的电力消费结构 (2017年)^{iv}

3

江浙沪分布式光伏发展历史趋势⁶

从可再生能源电力消纳情况来看^v，2019年，全国平均可再生能源电力消纳比重为27.5%，上海由于外调电力中可再生能源电力（尤其是水电）比重较高，整体可再生能源电力的消纳比重达到34.5%，但江苏和浙江仅为15%和20%，显著低于全国平均水平。其中，上海、江苏和浙江的非水可再生能源电力消纳比重分别为4.2%、7.4%和6.7%，均大幅低于全国10.2%的平均水平。2020年起，国家将正式考核各省级行政区域可再生能源电力和非水可再生能源电力消纳责任指标。江苏和浙江的非水可再生能源电力消纳比重离2020年目标分别存在0.1%和0.8%的差距。一方面，两省一市既面临经济发展所需大量新增能源供应的压力，又受限于稀缺的土

地和空间资源而无法大规模发展集中式风电场和光伏电站，提高可再生能源电力消纳比重面临很大挑战。另一方面，这一地区产业发达，工业园区集中，厂房屋顶资源丰富，也有大量的渔业养殖水域和农业大棚，这些设施为发展分布式光伏提供了良好的契机。

长三角地区是我国分布式光伏的主阵地之一。截至2019年底，江苏、浙江、上海共计开发分布式光伏1693万千瓦（见图3），占全国分布式光伏装机总量的27%^{vi}。尽管如此，分布式光伏发电量占该地区用电量的比重仍是微不足道的⁵。分散式风电在长三角地区乃至全国范围内，都还处于起步阶段。

长三角地区发展分布式清洁能源的战略机遇

中国提出“努力争取2060年前实现碳中和”，以及“到2030年，风电、太阳能发电总装机容量将达到12亿千瓦以上”，这些目标的提出，为长三角地区等重要经济区加速低碳转型、实现绿色增长提供了历史性的战略机遇。世界资源研究所采用绿色经济模型（Green Economic Model）对长三角地区二氧化碳排放率先达峰的可行性和由此带来的社会经济影响开展了研究，在绿色经济情景下，长三角地区温室气体排放总量将在“十四五”末期达峰，同时带来增加财政收入和创造就业岗位等一系列经济社会效益^{vii}。

长三角一体化发展是中国重要区域发展战略。2018年，习近平总书记在首届中国国际进口博览会上宣布将长三角一体化发展上升为国家战略。2019年，国家出台《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》，明确了长三角地区是全国发展强劲活跃增长极、高质量发展样板区、率先基本实现现代化引领区、区域一体化发展示范区、新时代改革开放新高地“一极三区一高地”的战略定位，对长三角地区高质量发展赋予了新要求。

生态文明建设要求长三角地区必须以绿色发展为引领。要推动长三角地区高质量发展、打造世界级城市群，必须以绿色发展为引领，在能源建设、环境保护、低碳发展方面率先行动起来，突破资源禀赋约束，探索集约、高效、精细化的清洁能源发展路径，打造长三角一体化绿色生态圈。

电力体制改革加快推进分布式能源发展。在进一步深化电力体制改革的背景下，长三角地区也在积极推进相关试点。浙江是第一批电力现货市场试点地区之一，在《浙江省电力体制改革综合试点方案》中，全面放开用户侧分布式电源市场，积极开展分布式电源项目的各类试点示范是一项重点内容。江苏是全国首个启动分布式发电市场化交易试点的省份。2019年12月，江苏省发布《江苏省分布式发电市场化交易规则（试行）》，选取7个项目开展分布式发电市场化交易试点，在全国范围内起到重要示范和引领作用。

长三角地区发展分布式清洁能源的现实意义

分布式可再生能源的开发利用是践行我国能源生产和消费革命的重要路径，以长三角为代表的中东部地区有动力且有条件为此做出贡献。

第一，发展本地分布式清洁能源是长三角地区提高自身能源安全保障水平的必由之路。长三角地区人口密集且电力负荷大，保障能源安全要求高。就近开发利用可再生能源，实现清洁电力的就近消纳，推动“电从远方来”和“电从身边取”相

结合，是长三角地区逐步摆脱化石能源依赖、提高能源自给率、有效保障能源安全的必然选择，也是推动长三角地区能源“新技术、新模式、新业态”发展的必由之路。

第二，发展分布式清洁能源是推动“绿色新基建”的必要元素。加强新型基础设施建设是激发新消费需求、助力产业升级的重要途径。长三角等经济发达地区是推动新基建工作的重要主体，不少沿海省份也提出了雄心勃勃的“新基建”发展计划。但以5G、数据中心等为代表的新基建项目大多都是能耗大户，对全社会能源供给、用能结构提出了更高要求。若在5G基站、数据中心、充电设施等负荷密集区，利用厂房屋顶、工业园区空地等因地制宜地发展分布式光伏和分散式风电，并与储能、虚拟电厂、综合能源服务等相结合，实现新基建和分布式清洁能源深度融合，推动长三角地区能源“新技术、新模式、新业态”与“新基建”的协同和绿色发展。

第三，发展分布式清洁能源有助于拉动民间投资和促进小微企业发展。2020年新冠肺炎疫情发生以来，抗风险能力较低的民营企业群体和中小微企业面临巨大压力。后疫情时代，能源行业既要发挥重振经济的支撑作用，也应充分释放能源建设在恢复经济、促进就业方面的潜力。分布式清洁能源规模小、分布广、投资门槛低，但前期准备工作繁杂、人员投入多，大型能源企业开发分布式能源不具优势。东南沿海地区民间资本充裕，单个分布式能源项目开发资金需求不大，通过与千家万户的协作，可填补大型能源企业动力不足、人力不足、投资不足的空缺，成为拉动民间企业投资、增加就业的重要方式，形成“绿色能源助力经济发展”的新局面。同时，以“自发自用”模式开发分布式可再生能源项目，还能帮助用户免除电力采购过程中的输配电费用，节省用电成本。

第四，发展分布式清洁能源可成为增加当地民众长期稳定收入的一个来源。在德国、丹麦等分布式能源发展较好的国家，“社区风电”和“社区光伏”等模式使得可再生能源开发企业与当地社区、居民形成紧密的利益共同体。发展分布式清洁能源在提供绿色电力的同时，也带动了当地就业与经济发展。在我国东南沿海地区发展分布式清洁能源，可结合当地旅游开发、特色小镇建设，充分利用工商业和居民屋顶及“田间地头”空闲土地，吸引农户、村集体以屋顶或土地入股参与投资，实现能源开发效益均等化，惠及当地民众，促进乡村集体经济发展。

分布式清洁能源发展的国际经验

全球来看，欧洲的分散式风电和分布式光伏是风能和太阳能利用的主要模式之一。分散式风电在欧洲起步较早，技术和商业模式都较为成熟。风电场的开发规模由资源条件、负荷条

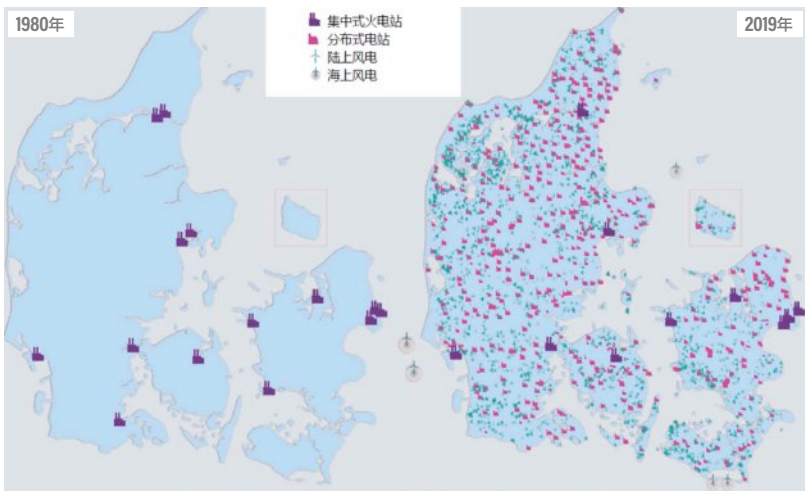
丹麦气候和能源发展目标

《2030年气候和能源政策框架》，
丹麦提出到2020年实现可再生能
源占比30%

丹麦政府提出到2020年实现可再生
能源占一次能源消费比重达到35%，
风电发电量占全社会用电量的50%



丹麦风电发展项目布局⁸



件和并网条件决定，通常不刻意区分集中式和分散式。一般靠近负荷中心、单体规模不大的风电项目，所发电力直接接入配电网内消纳，也就是分散式风电项目。丹麦和德国分散式风电占风电总装机容量的比重都很高，同时，德国也是分布式光伏发展最为成功的国家之一。因此，本章将重点介绍丹麦和德国推广分散式风电和分布式光伏的成功经验。

丹麦：分散式为主的风电开发模式

丹麦是全球风电发展最为领先的国家之一，一个关键因素就是，在欧盟整体低碳转型的框架下，丹麦政府制定了明确的气候和能源战略目标（见图4），到2050年完全摆脱对化石能源的依赖^{viii}。

发展以风电为主的可再生能源是丹麦实现其战略目标的重要途径。政府为此出台了相应的政策，概括起来主要体现在三个方面。一是对风电的财政支持政策，包括初期的投资补贴和后来的固定上网电价补贴；二是政府对化石能源实施的碳税使得风电的经济性优势进一步显现出来；三是可再生能源优先上网的政策。

截至2018年底，丹麦一半以上的电量供应来自可再生能源，其中，风电是最主要的可再生能源，占46%⁷。根据丹麦风能协会统计，截至2019年底，丹麦累计并网风电610万千瓦，其中接入20千伏及以下电压等级配网的装机容量超过70%。图5对比了1980年和2019年丹麦的电源布局，可以看出，分布式电源已遍布丹麦全国。

分散式风电在丹麦之所以取得成功，除了得益于本国支持可再生能源发展的一系列政策，还与以下这些因素息息相关：

- 丹麦国土面积较小⁹，周边大部分环海，整个国土范围内的风能资源差异较小，因而就近开发、就地利用分散式风电，能够以较低的成本满足用户的电力需求，是最便捷、经济的风电开发方式，不需要建设大规模的输电线路进行更大范围的电力资源配置。
- 社区风电模式的多重效益。欧洲民用电价较高，居民对投资自发自用、余电上网的社区风电项目有较高的积极性。社区风电项目用地成本较低，从而降低了投资成本。丹麦80%的风电场都具有社区风电的性质，社区居民可购买风电项目股份，利用项目收益进行再投资，为社区居民带来多重福利，如完善社区基础设施、创造新的就业机会等，居民认可度较高，有效解决了分散式风电开发的土地供应及邻避效应问题。
- 具有高度灵活性的欧洲电网系统和完善的电力交易市场。丹麦电网与欧洲电网互联，瑞典和挪威的水电、法国的核电都能成为丹麦风电的灵活性调节电源。北欧电力交易所是欧洲最早的跨国跨区域电力交易市场，交易方式以日前交易为主，当实际供需与日前交易提交的信息不匹配时，可辅之以日内市场来平衡这一波动，从而在技术上解决了风电发展面临的系统调节问题。
- 电力体制的调整为能源转型扫清市场障碍。2005年前后，丹麦对原有的电力市场架构进行改革，将两大垂直一体化、统管发电、输电和配电业务的电力公司合并，成立了非营利的国家电

网公司，负责输电网和天然气管网的运营，对所有的市场参与者公平开放。而发电、配电业务则完全放开，在上游供应端和下游用户端形成竞争格局。发电、输电与售电三个环节相互独立却又密切配合，使得风电等可再生电力“优先并网”的策略得到了有效执行，从而增加了分散式风电开发的市场吸引力。

德国：分布式能源有力推动能源转型

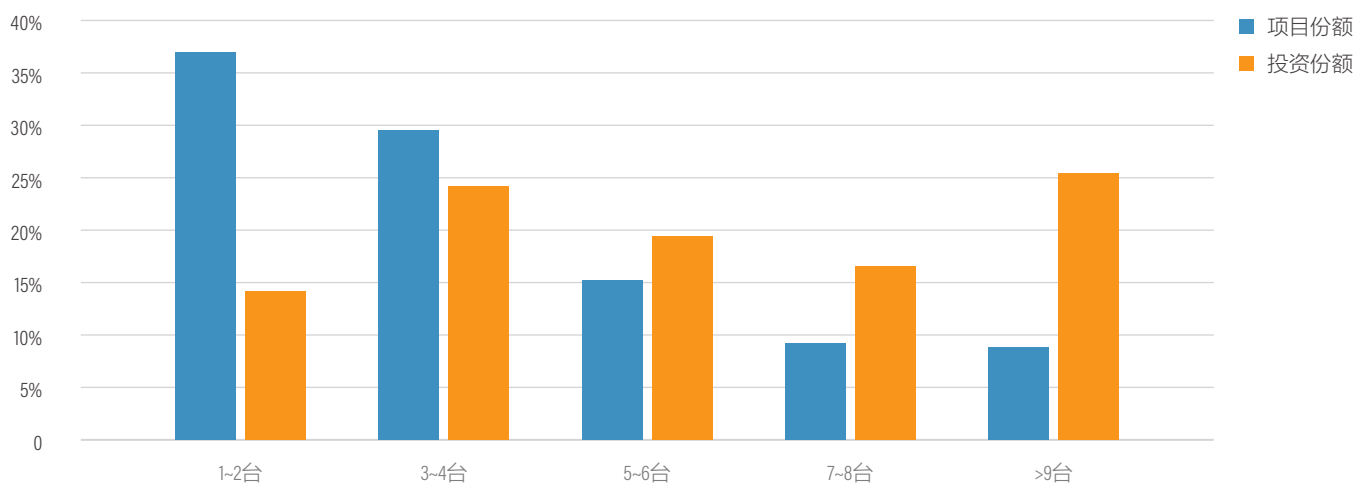
德国设立了到2050年实现净零排放的中长期减排目标^{ix}，并且明确了2038年煤电彻底退出的时间表和路线图^x。打造以可再生能源为支柱的能源系统是德国实现中长期能源和气候战略的重要路径。

德国非水可再生能源装机容量位列全球第三，仅次于中国和美国。人均非水可再生能源装机容量达到1.4千瓦，分别是中国 and 美国的4.7倍和2.6倍¹⁰。截至2019年底，德国可再生能源总装机容量为1.3亿千瓦，其中，风电6080万千瓦，光伏发电4900万千瓦，分别占可再生能源总装机容量的46.5%和37.5%^{xi}。风能和太阳能的开发利用主要通过分散式/分布式系统来实现。

与丹麦类似，德国风电也是以分散式开发为主，75%为社区风电，90%以上的陆上风电场装机数量小于9台（见图6），主要接入6~36千伏或110千伏配电网，以就近消纳为主。

社区风电项目为居民参与气候和环境保护活动提供了机遇。居民可以参与到项目初期设计、集资、建设和运营管理等环节

德国风电机组布局接入情况（2017年）^{xii}



中，社区的一些特殊需求可以较早期地被考虑进来。根据项目运营公司性质的不同，社区居民参与决策的程度也有所区别。

社区风电项目为当地提供了清洁电能，吸引了投资，创造了就业岗位。居民通过购买公司股权，不仅可以获得政府补贴，还能获得项目盈利的分红，增加了收入。此外，风电场至

少70%ⁱⁱⁱ的贸易税上缴给社区，为当地经济发展做出了重要贡献（见图7）。

德国也是全球推广分布式光伏发电最成功的国家之一。尽管光照资源条件并不好，年平均有效利用小时数仅800小时左右ⁱⁱ。根据2018年的统计数据，德国光伏装机容量中，地面电站

专栏 1

Wolfhagen: 100%可再生能源的德国小镇

2008年，Wolfhagen小镇提出了到2015年实现100%可再生能源的目标，并着手推动风力发电。起初，对此计划持支持和反对意见的民众都大有人在。小镇管理者通过拍摄纪录片进行宣传，组织正反两方加强对话沟通，最终获得了大部分民众的支持。

Wolfhagen从2002年就开始推动能源民主，2012年，为了确保公民直接从可再生能源投资中受益的政治承诺，成立了以公民为基础的能源合作社，让公民成为可再生能源项目的参与者，并拥有投票权。合作社成员以入股的方式参与社区可再生

能源项目的开发，每股股金500欧元，最多可认购40股；投票时则一人一票。风机附近的居民享有优先认股的权利。合作社中地方政府占股75%，居民占股25%。由于投资回报率可达4%~5%，高于一般银行的定期存款利率，因此民众参与的意愿很高。具备相关专业知识的民众还可以在合作社获得工作。

能源合作社的盈利也用于回馈社区，比如更换LED路灯，成立能效基金补助合作社成员购置节能家电，为中小学安装光伏发电系统等。2015年，小镇如愿实现了100%可再生能源的目标，成为全球能源转型的典范。

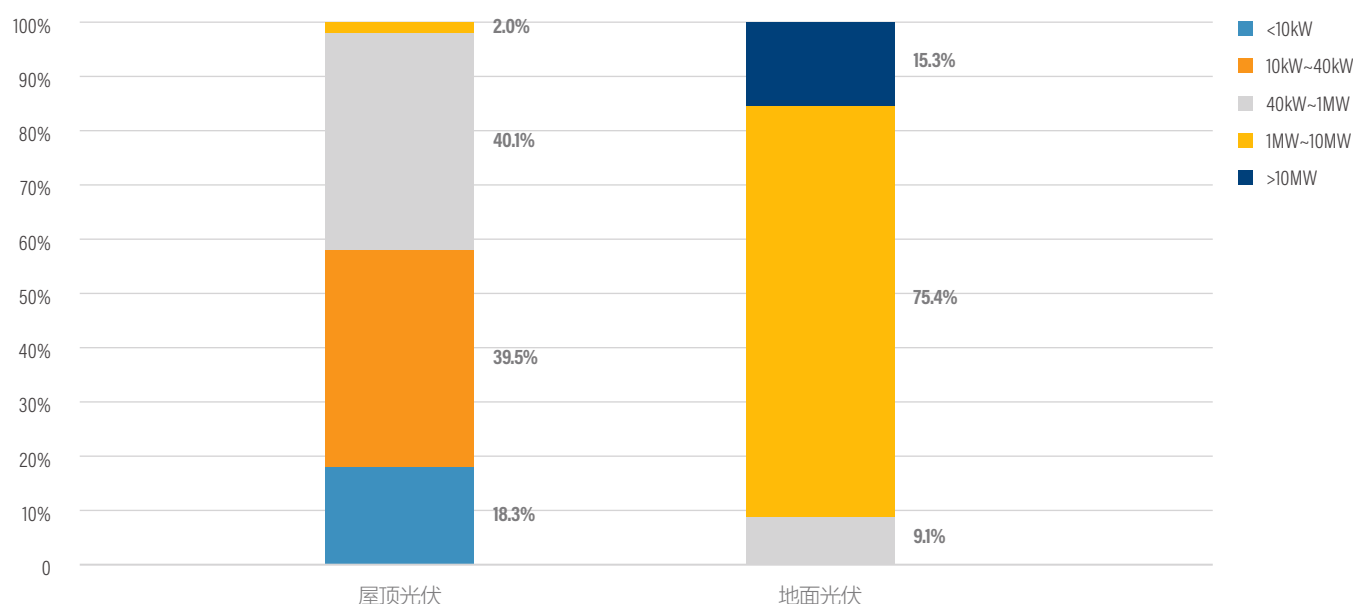
7 图

德国社区风电项目



资料来源：Aditya Chakraborty. How a small town reclaimed its grid and sparked a community revolution. 2018; 高如萍. 从德国童话村到公民能源合作社：谈沃尔夫哈根市的能源转型之路. 2019

德国分布式光伏规模布局情况（2018年）¹²



占28%，工商业屋顶光伏占58%，居民屋顶光伏占14%^{xiv}。98%的屋顶光伏系统都是千瓦级（见图8）。

政策支持是德国分布式光伏得以发展壮大的主要原因。德国的可再生能源电价补贴机制随着成本、市场等条件的变化而动态调整。2014年之后，德国对可再生能源的补贴由起初的固定电价补贴（FiT）逐渐转向溢价补贴（FiP），意味着上网电价水平由原来的固定电价转变为“电力市场价格+溢价补贴”。但是，为了维持小规模分布式光伏项目的补贴稳定性，对于装机规模在100千瓦以下的光伏项目仍保留了有效期为20年的固定电价补贴。

此外，德国的政策性银行还为小型光伏项目提供低息贷款，从而降低了项目的融资成本。为了鼓励自发自用，减少分布式电源接入带来的配电网改造成本，政府对于分布式光伏项目配套的储能设施还提供额外的补贴，这些措施都大大促进了德国分布式光伏的发展。

长三角地区分布式可再生能源发展的实践基础

长三角地区是我国分布式光伏开发较早的地区，分散式风电开发也主要从江苏开始起步。长三角地区已积累了较多的分布式可再生能源开发经验。课题组在研究过程中也调研了一些

典型案例，并从商业模式、经济效益、社会效益等角度进行了剖析，在此基础上总结了我国分布式可再生能源进一步发展的技术和经济可行性。

分布式光伏案例

分布式光伏的主要应用场景包括工商业屋顶光伏和居民屋顶光伏。发展屋顶光伏，长三角地区具备一定的优势条件。首先，该地区光伏制造业聚集，产业链完整，为光伏产品的本地化应用奠定了基础；其次，该地区工业发达，厂房屋顶资源丰富，再加上工商业电价在全国范围内处于相对较高的水平，使得企业有较高的积极性开发自发自用的光伏项目，从而节省用能成本。2016年浙江提出光伏“百万屋顶”计划，提出了到2020年全省建设家庭屋顶光伏装置100万户以上，总装机规模300万千瓦左右的目标^v。报告对分布式光伏的几种典型应用模式分别选取一个案例进行介绍。

工业屋顶光伏：中大元通屋顶光伏项目

项目概况

中大元通屋顶光伏项目是浙江省杭州市余杭区的屋顶光伏示范项目（见图9），该项目投资总额为4800万元，于2017年2月开工，当年7月并网。

该项目屋顶面积达4.7万平方米，总装机容量为5992千瓦，年等效利用小时数可达900小时，接入10千伏公共电网。

9

中大元通屋顶光伏项目



经济效益与减排效益

该项目实现了多重环境效益和经济效益。既解决了业主屋顶漏水，厂房易老化的问题，同时，屋顶的光伏系统也起到了隔热的作用，有效减少了厂房内的空调用电需求。相对于传统的购电模式，该项目每年节省电费54万元，每年可实现约3000吨二氧化碳减排量。

该项目是工业屋顶分布式光伏较为成功的代表，主要原因包括：一是采用能源服务公司模式开发运营。项目投资方采用能源服务公司（ESCO）模式进行投资、建设和运营，自有资金比例100%，所发电量以目录销售电价的83折出售给屋顶业主用户。二是自用电比例高。该项目的电力消纳模式为自发自用、余量上网，自用电比例为80%，余量上网执行当地的燃煤标杆上网电价（0.4153元/千瓦时）。三是项目享受的补贴较高。项目所发全部电量享受国家、省、市三级补贴，其中国家补贴为0.42元/千瓦时，省级补贴为0.1元/千瓦时，市级补贴为0.1元/千瓦时。因而项目的经济性较好，投资收益率达到16.7%，投资回收期为6年左右。

商业屋顶光伏：宜家（苏州）商场屋顶分布式光伏发电项目概况

宜家（苏州）商场屋顶面积约5000平方米，安装416千瓦分布式光伏发电系统，年有效利用小时数达到1027小时（见图10）。光电转化效率最高达17.93%，符合2018年国家“领跑者基地”满分技术要求。

经济效益与减排效益

该项目2018年全年发电量为44.7万千瓦时，在减轻商场用电高峰期压力的同时，为宜家（苏州）商场带来可观的经济收益，包括全年节省电费38.4万元，以及可再生能源发电补贴16.5万元。

10

宜家(苏州)商场屋顶分布式光伏发电项目



按全生命周期计算，项目平均每年可发电39.3万千瓦时，替代燃煤169吨，避免80.9吨二氧化碳排放、2.0吨二氧化硫排放及1.9吨氮氧化物（以二氧化氮计）排放，具有良好的环境效益。

该项目是商业屋顶分布式光伏的典型示例，主要有以下几方面的优势：一是宜家（苏州）商场是大型商场，屋顶连片面积较大，具备开发分布式光伏的条件。二是长三角地区商业电价较高，而宜家（苏州）商场自身空调、照明等用电负荷较大，自用电比例高。自发自用的分布式项目可为业主降低能源使用成本，并有效保障项目的投资收益。三是项目由业主自己投资，新能源开发公司承接工程总承包（EPC），可免去第三方投资带来的融资租赁贵、电费结算难等问题。

居民屋顶光伏：临安锦北街道居民屋顶光伏项目

项目概况

浙江省杭州市临安区锦北街道居民屋顶光伏项目目标是建成1000户居民屋顶光伏发电系统，装机容量为4680千瓦，预计总投资为3978万元（见图11）。截至2019年4月，该项目已安装并网463户，完成装机3100千瓦。

11

临安锦北街道居民屋顶光伏项目



商业模式与融资模式

临安区各村成立了股份经济合作社。以上东村为例，该村共安装居民屋顶光伏135千瓦，年发电量13.5万千瓦时，以0.4153元/千瓦时的上网电价出售给电网，同时获得0.42元/千瓦时的国家补贴和0.1元/千瓦时的省级补贴。每千瓦时的收益达到0.93元。

为解决项目资金问题，临安农村信用合作联社协助锦北街道推进项目开展。信用社创新采用“光伏贷”模式，信贷员下乡宣传贷款业务并上门服务，用户安装电站费用可全额通过“光伏贷”解决。

该项目是居民屋顶分布式光伏开发的成功实践，值得推广的经验包括：

- 项目由同一公司进行统一管理。项目选取了一个专业化开发公司，对屋顶资源的规划、建设和使用制定统一要求。该公司通过整合户用屋顶资源，集聚较多的开发面积，有效提升了分布式光伏开发的专业化管理水平。
- 采用灵活的业主参与模式。户主参与项目开发的方式有两种：一种是“出屋顶，不出钱”，发电收益前8~10年归银行，之后15~17年归户主；另一种是“既出屋顶，也出钱”，户主出资安装屋顶光伏，发电收益也全部归户主。业主可结合自身情况自行选择，有效提升了业主参与项目的积极性。

分散式风电案例

2011年，国家能源局发布了《关于分散式接入风电开发的通知》，标志着分散式风电在中国正式启动。随后几年一直处于探索阶段，一系列支持分散式风电发展的产业政策并未取得理想的效果。2018年，《分散式风电项目开发建设暂行管理办法》正式印发，从简化项目核准流程、规范规划编制、拓宽融资渠道等多方面进一步完善政策机制。截至2019年5月，全国19个省份和地区出台了分散式风电相关的政策和规划，规划总装机容量接近660万千瓦¹³。但在落地过程中，由于存在项目核准繁、土地审批难、环保标准模糊等原因，分散式风电发展规模整体较小。报告选取两个相对成功的案例，分别代表了分散式风电在园区和农村发展的两类应用模式。

园区分散式风电：江阴分散式风电项目

项目概况

江阴分散式风电项目是中国首个真正意义上的分散式风电项目群，累计核准分散式风电机组23台，投运发电11台，累计装机容量32.2兆瓦（见图12）。其中，江阴港港口集团公司与远景能源合作的分散式风电项目由江阴港提供土地，由远景能源负责投资、建设和运营。

技术路线

江阴港港口集团公司安装了7台分布式风力发电系统，项目总装机容量为16.8兆瓦，分布在集团公司两个港区内。该项目总占地3.36亩，仅占码头总面积的0.11%，通过因地制宜的机位选址及机型选择保证容量和发电量，适配港口定制的电气接入设计方案及系统监测方案，保证建设和生产的高效性。

经济效益

自2018年5月首台风电机组并网以来，分散式风电已经累计发电3653万千瓦时，两个港区风电占用电量的比重分别达到了48%和60%，累计节省用电成本187.14万元，成本节省率超过10%。（截至2019年10月底数据）

环境效益

该项目并网以来运行稳定，相较于传统火电，11台风电机组所发电量相当于每年替代燃煤2.5万吨，避免二氧化碳排放7.5万吨，相当于植树12万棵，港区能源消费结构明显优化，污染防治和绿色管理能力明显提升。

江阴分散式风电项目为分散式风电在中国东南部人口稠密区和电力负荷中心的发展探索了经验，对于中国分散式风电的发展具有重要的参考和借鉴价值。总结江阴分散式风电项目开发成功

图 12

江阴分散式风电项目



的经验，主要有两个特点。一是合同能源管理模式实现开发方和用电方共赢。该项目采用能源合同管理模式进行开发建设，消纳模式为“自发自用、余电上网”。分散式风电生产的绿色电能供港口生产直接使用，实现就地、就近消纳。二是地方政府跨部门协作，优化审批流程。为了理性地推进项目，江阴市政府由市发改委牵头相关部门制定了《江阴分布式风电可行性规划》，在严谨分析、科学规划、依法依规进行环评的基础上，与城市整体规划有效衔接，各个行政管理部门对分散式风电发展形成了共识，大大提升了项目审批效率。

农村分散式风电：平顶山凤凰岭分散式风电项目

近年来，我国中部和东南部地区开始利用田间地头进行农村分散式风电开发。河南平顶山凤凰岭分散式风电项目就是其中的一个典型案例。

项目概况

平顶山凤凰岭分散式风电项目是河南省首个小型民营企业开发的分散式风电并网项目（见图13）。该项目于2017年11月列入河南省“十三五”分散式风电开发计划，12月取得核准批复，2018年6月正式开工建设，12月项目全容量并网投运，是行业内工期较短、单位造价较低、综合收益较好的典范。

图 13

平顶山凤凰岭分散式风电项目



技术路线

该项目总装机容量12兆瓦，全投资8000万元，采用预制舱模式新建一座35千伏开关站，送出线路总长6.2千米。风电场位于河南省叶县，建设于乡野田间，距离村庄350米。项目采用6台塔筒高度为120米的2兆瓦风力发电机组，叶片长度59.8米。单个风电机组吊装调试正常运行后占地面积仅为20~40平方米，单个箱变占地约8平方米。

环境效益

该项目通过高效利用当地风能资源，预计每年可发电2880万千瓦时，与相同发电量的火电项目相比，相当于每年替代燃煤8640吨标准煤（以平均标准煤煤耗为0.3千克/千瓦时计），每年避免二氧化硫排放64吨，二氧化碳排放2.4万吨，氮氧化物排放55吨。所发电力接入35千伏配网就近消纳，缓解了本地区电网负荷调配力度。同时，该项目施工时在原有道路的基础上征地修路，工程结束后还给村民复耕，整个风电场不但对当地生态未产生影响，还与村镇、燕山水库完美结合成一道亮丽的风景线，为农村经济发展和民生改善注入新动能。

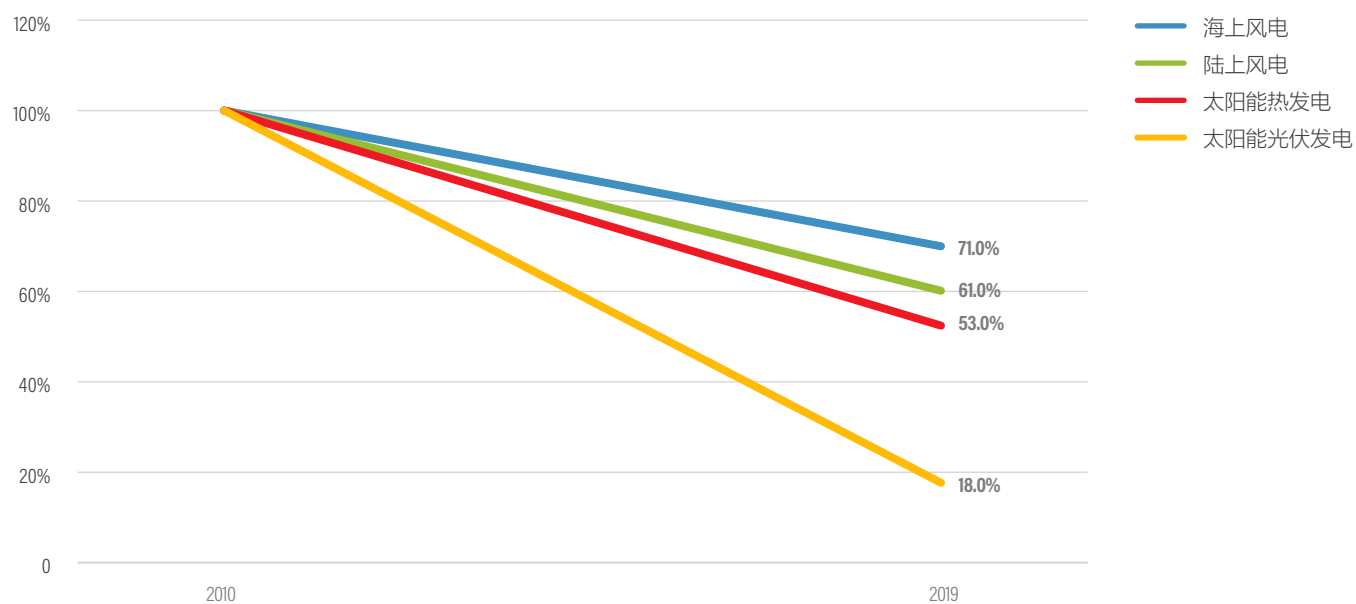
总结平顶山凤凰岭分散式风电项目开发成功的经验，主要有几个特点：一是采用村集体经济入股的创新方式。充分利用农村田间地头等空闲土地，村集体经济以土地入股的方式参与分散式风电开发建设，在更加集约化利用土地的同时，也为当地村民带来稳定收益。二是开发企业采用设备融资租赁方式解决融资难的问题。该项目注册资金2500万元，融资5500万元，设备融资租赁一般有2年宽限期，计息以实际使用资金额度计算，本项目建设周期共计6个月，缩短建设周期的同时也缩短了资金计息期限，最大化节约总体成本。三是项目前期工作基础扎实，地方政府给予支持。由于执行核准承诺制，该项目核准流程大大简化，从立项到并网发电仅用时13个月，是行业内工期较短的项目。

分布式可再生能源规模化发展的优势条件

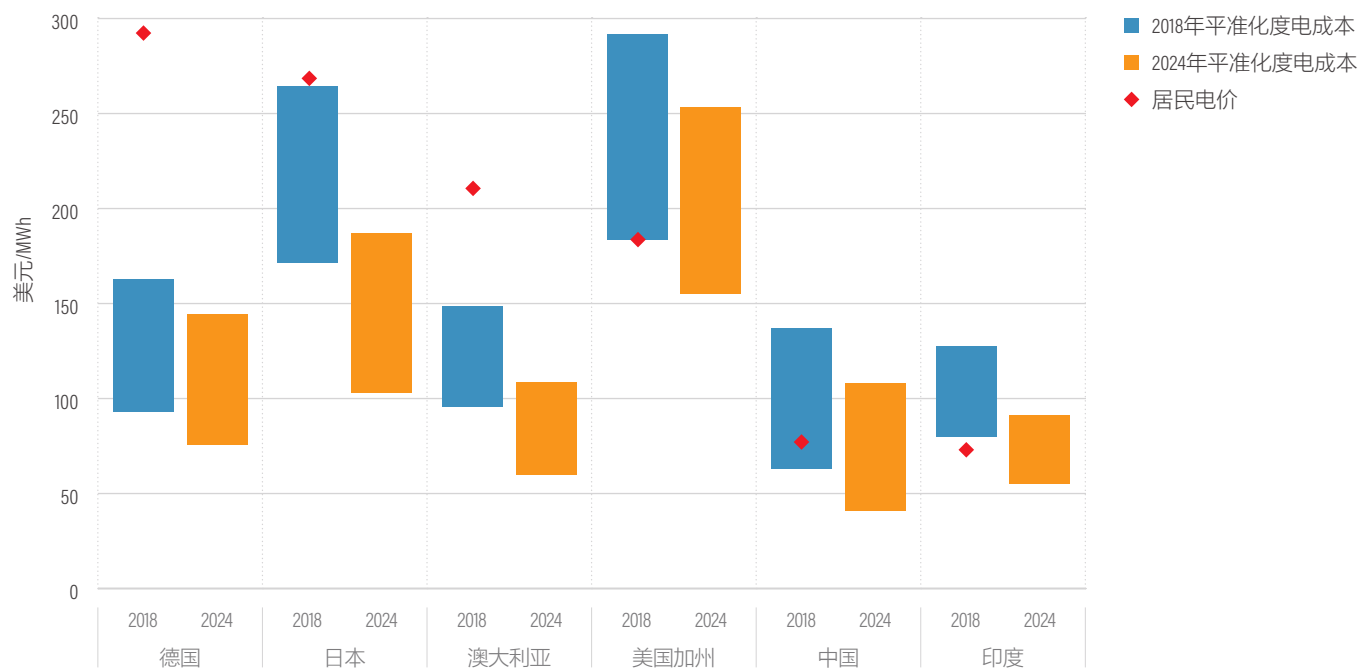
近年来，以风电和光伏为主的可再生能源具有良好的环境效益和成本效益已逐渐在全球范围内得到认可。长三角等地区分布式光伏和分散式风电的成功案例也进一步说明了分布式可再生能源已经具备了成熟的技术基础和具有竞争力的成本优势。

首先，可再生能源发电成本在过去十年间大幅下降，分布式光伏成本下降远超预期。根据国际可再生能源署的统计，2010年以来，全球范围内太阳能光伏发电和风电成本分别下降了82%和39%（见图14）。2019年，全球所有新投产的可再生能源发电项目中，56%的项目成本都低于最便宜的化石燃料发电成本^{xvi}，全球最低的光伏发电上网价格已降至1.35美分/千瓦时^{xvii}（相当于每度电0.1元）。德国、日本、澳大利亚等分布式光伏的平准化成本

近十年风电和太阳能发电平均度电成本变化趋势^{xviii}



分布式光伏平准化度电成本^{xix}



已显著低于居民用电价格（见图15）；中国的电价体系存在工商业对居民的交叉补贴¹⁴，居民电价显著低于工商业电价，但预计也会在“十四五”时期实现居民用户侧的分布式光伏平价。

其次，分散式风电技术快速进步。目前，我国低风速风机高塔

筒、长叶片、微观选址技术已全球领先，风机轮毂高度从最早的50米、70米，现在已突破150米（见图16），可开发风资源范围从6米/秒以上扩大到5米/秒左右，江苏内陆沿长江一带风电项目利用小时数已达到2700小时，堪比十年前西部一些资源最好地区的可利用小时数。同时，降噪技术的成熟应用也可大幅减少风电机组对周围环境的影响。此外，一台风机基础占地面积约400平方米，但在地面的排他性占地面积可控制在20平方米左右（见图17），其余部分覆土之后，并不会影响土地的农业、养殖、绿化等用途。

第三，风电和光伏发电全生命周期环境效益远远优于化石能源。综合考虑项目建设期、运营期和退役期的温室气体排放，陆上风电全生命周期的碳足迹为7.0~10.8gCO₂e/千瓦时，海上风电为9~17gCO₂e/千瓦时，屋顶光伏系统为15~34gCO₂e/千瓦时，光伏电站为10~29gCO₂e/千瓦时，而采用了CCS技术的煤电，全生命周期的碳足迹仍高达230~935gCO₂e/千瓦时¹⁵。未来随着技术进步，光伏组件效率进一步提升，光伏发电的碳足迹还有下降的空间。

总的来看，分布式可再生能源的开发利用在技术上已经明显成熟，在经济性上也已具备竞争优势。长三角地区应基于已有基础和优势，紧抓能源转型的战略机遇，将发展本地分布式能源作为区域绿色高质量发展的关键举措，努力打造我国分布式可再生能源发展的先进样板区。

图 16

风机高度及叶片长度变化趋势

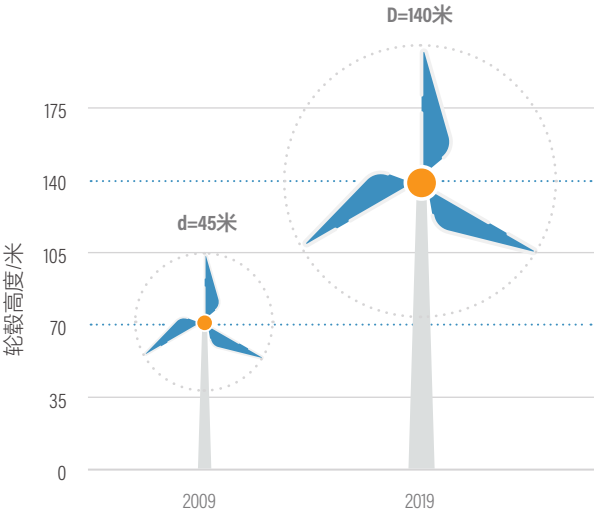
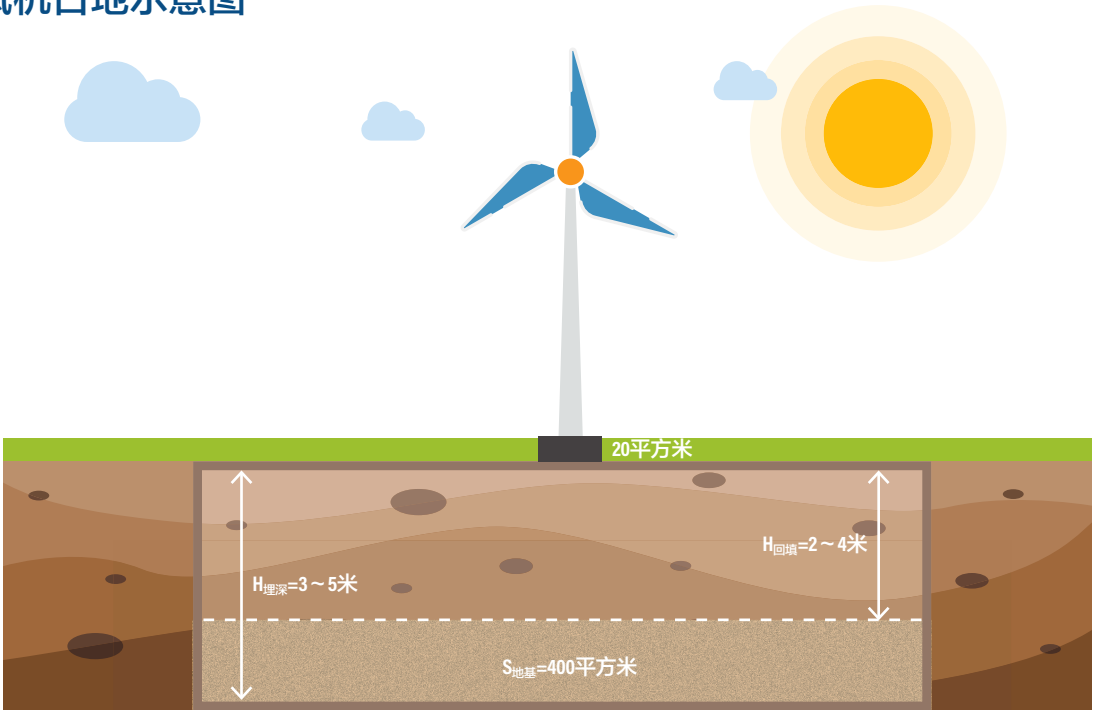


图 17

一台风机占地示意图



长三角地区分布式可再生能源发展潜力评估

当前我国还没有针对分布式可再生能源的资源潜力做过详细评估，也没有对各地区分布式电源接入电网的承载力进行过系统测算。本研究从多个维度对长三角两省一市可再生能源的开发潜力做了初步评估，并在当前电力系统运行的边界条件下，对可消纳的总量做了初步定量分析。

分布式可再生能源的潜力一般包括资源可开发量、技术可开发量和经济可开发量。资源可开发量是基于风资源以及太阳能辐照资源等数据得到的结果，常用的评估方法包括直接观测和数值模拟。技术可开发潜力主要考虑在现有技术条件下能够开发利用的规模，重点考虑屋顶/土地及其他设施的可利用面积、单位面积平均开发容量等。经济可开发量是在技术可开发量的基础上，进一步叠加成本因素，确定具有商业开发价值的装机规模。

由于不同技术类型分布式电源的潜力受到不同因素的影响，需要结合电源特点进行评估。同时，分布式电源的开发程度也受电网条件的影响，大规模分布式电源接入电网后，也会对电网的运行调度带来影响。因此，有必要对电网的承载力¹⁵进行评估。

本章的潜力评估包括三个层面：分布式光伏开发潜力、分散式风电开发潜力，以及分布式电源接入电网承载力。

分布式光伏开发潜力

分布式光伏的潜力主要受到太阳能资源、可用屋顶面积、渔光/农光互补场景下水域面积、大棚面积等因素的影响。本研究选取两种测算方法，对江浙沪地区分布式光伏发展潜力进行评估，结果显示分布式光伏开发潜力为1.8亿~2亿千瓦。

方法一：分场景集成

以工商业屋顶、居民屋顶、农业大棚、水产养殖等“光伏+”产业设施为重点应用场景，对江浙沪地区上述场景下的可利用面积进行统计汇总，对不同场景设定相应的分布式光伏装机系数，测算出江浙沪地区分布式光伏的可开发潜力。

第一类场景：工商业屋顶

采用为式（苏州）智能科技有限公司的鹰眼屋顶识别系统，以卷积神经网络图像识别算法为基础，对长三角地区面积为2000平方米以上的屋顶进行人工智能识别，利用faster R-CNN 深度学习模型，通过不断迭代学习，从卫星图片数据中准确识别屋顶信息，包括屋顶颜色、材质以及是否已安装光伏组件（见图18）。

图 18

分布式光伏（2000平方米以上屋顶）潜力测算模型

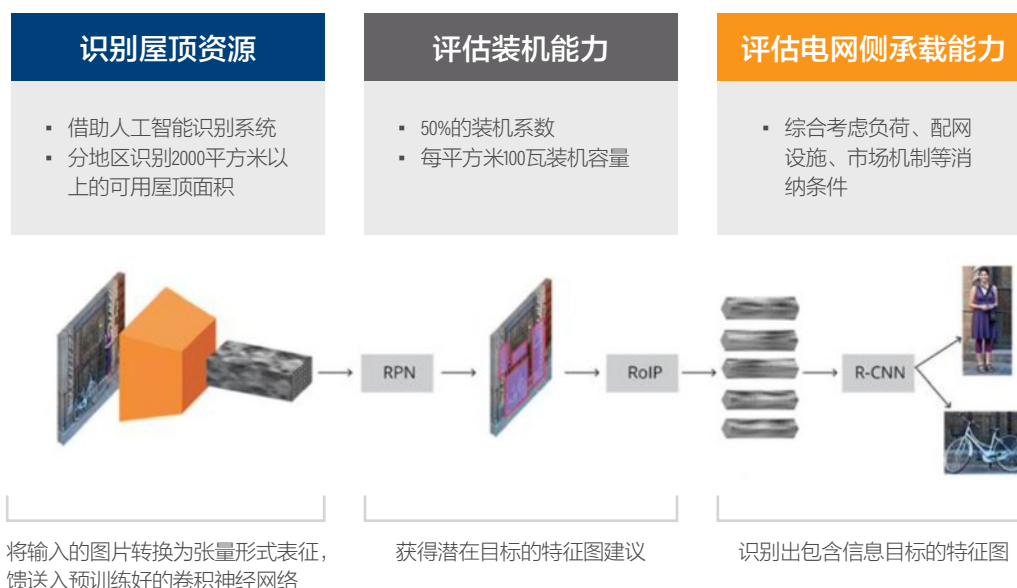


图 19

基于卫星图片的屋顶识别系统



该系统对江浙沪地区面积为2000平方米以上的屋顶资源进行识别和筛选，共识别出具备光伏安装潜力的屋顶28万余个，总面积21.2亿平方米。如图19所示，由于人工智能识别系统的矩形框是固定角度，与卫星图片中屋顶的角度并不能完全一致，考虑这一误差，以及屋顶朝向对装机潜力的影响等因素，按照50%的可用面积初步估算，保守测算潜在的装机潜力可达10627万千瓦(见表 1)。

第二类场景：居民屋顶

根据统计年鉴中江苏、浙江、上海的城镇和农村的人均住房面积和人口数量数据，可得到城镇和农村的居民住房总面积。根据专家意见征询，按照城镇居住建筑平均10层，农村居民建筑平均3层估算屋顶面积。再按照20%的装机系数和每平方米100瓦的装机容量，测算出居民屋顶的分布式光伏装机潜力为2727万千瓦（见表2）。

表 1

2000 平方米以上工商业屋顶分布式光伏装机潜力

区域	屋顶数量(个)	屋顶面积（万平方米）	装机潜力（万千瓦）
上海	32288	25830	1292
江苏	170312	124928	6246
浙江	78076	61771	3089
合计	280676	212529	10627

表 2

居民屋顶分布式光伏装机潜力

区域	城镇居民屋顶面积（万平方米）	农村居民屋顶面积（万平方米）	装机潜力（万千瓦）
上海	7784	5833	272
江苏	22426	47869	1406
浙江	15969	36459	1049
合计	46179	90161	2727

第三类场景：光伏与农业和渔业设施的结合

除了上述两类屋顶光伏的应用场景，分布式光伏与农业、渔业等产业相结合的模式应用前景广阔。对江浙沪地区农业大棚¹⁶、水产养殖等农光互补、渔光互补产业进行统计筛选，制定不同应用场景的装机系数（根据专家建议，取相对保守的假设：农业大棚面积按10%，水产养殖面积按20%），江浙沪地区分布式光伏应用场景规模及装机潜力见表3。

综合上述三类场景，江苏、浙江和上海的分布式光伏装机潜力可达到2亿千瓦。其中江苏省潜力最大，占总潜力的64%，浙江占28%，上海占8%。分场景来看，工商业屋顶的潜力最大，占51%，光伏+渔业和光伏+农业分别占19%和17%，农村居民屋顶和城镇居民屋顶光伏分别占9%和4%（见图20）。

表 3

江浙沪地区分布式光伏与产业相结合的应用潜力

地区	农业大棚（万平方米）	水产养殖面积（千公顷）	装机潜力（万千瓦）
上海	4823	16	142
江苏	294612	440	5585
浙江	46019	198	1648
合计	345454	654	7375

图 20

江浙沪地区分布式光伏可开发潜力

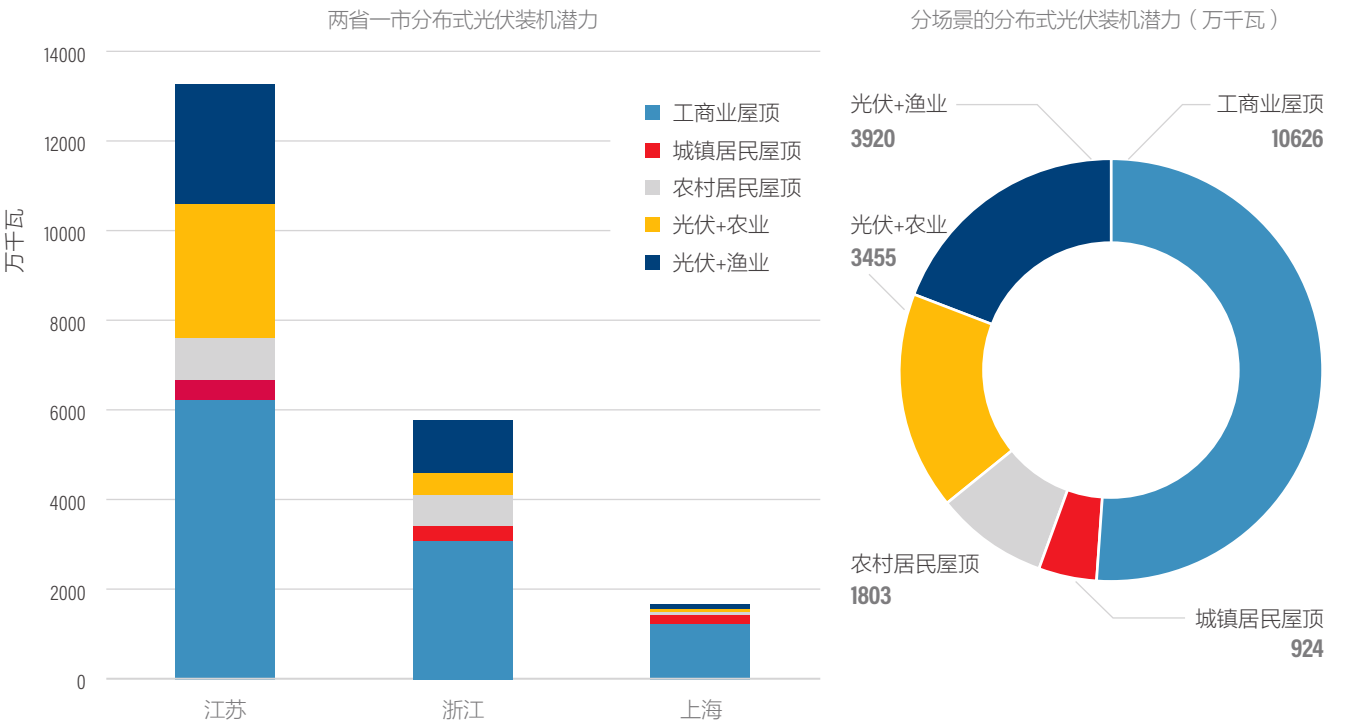


图 21

分布式光伏装机密度对比

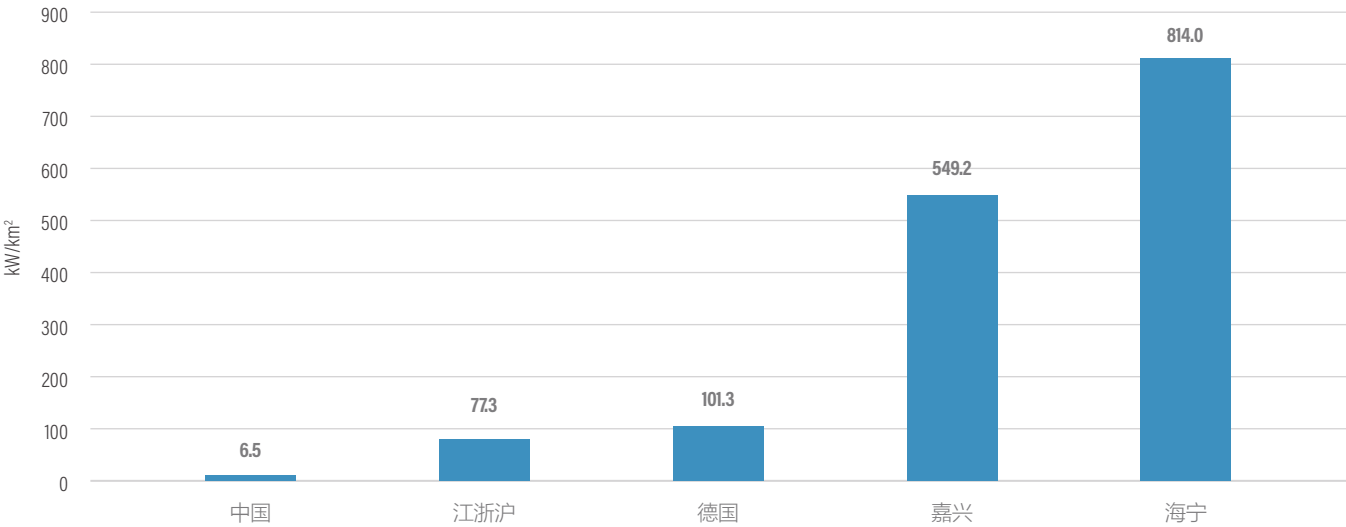


表 4

江浙沪地区分布式光伏装机潜力（海宁模式）

地区	面积（平方千米） ¹⁸	装机密度（千瓦/平方千米）	装机潜力（万千瓦）
上海	6340	814	516
江苏	107200	814	8726
浙江	105500	814	8588
合计			17830

方法二：海宁模式

浙江是光伏制造大省，2012 年底省政府开始在嘉兴开展光伏产业创新综合试点，嘉兴市由此开始了分布式光伏发电的探索。嘉兴市下辖的海宁市是浙江省首批清洁能源示范县，占地面积 700.5 平方千米。截至 2018 年底¹⁷，海宁分布式光伏装机容量为 57 万千瓦，占电网峰值负荷的 1/3，是本地电源的重要支撑；装机密度达到 814 千瓦/平方千米(见图 21)，成为中国乃至全球分布式光伏发展的新样板。

若简单类比，按照海宁市的分布式光伏装机密度，江浙沪地区未来分布式光伏装机潜力也可达 1.8 亿千瓦(见表 4)。

海宁模式有其自身的产业优势，同时也离不开各级政府及电网公司的支持。政策方面，在国家和省级财政补贴的基础上，增加市级和县级补贴，形成了四级补贴支持体系；并按装机容量对提供屋顶资源的企业给予一次性奖励，对村级屋顶分布式光伏发电项目给予连续三年的电量补贴。管理方面，出台了《海宁市推进光伏发电应用专项行动方案》，明确建设目标，细化部门分工，简化项目审批管理程序。并网方面，地方电网公司出台了多项技术规范，优化并网技术，最大限度保证分布式光伏接入电网。

参考海宁模式不代表完全照搬海宁模式，但分析海宁发展分布式光伏的经验，有助于江浙沪的其他地区探索符合自身条

件的分布式光伏发展之路。尤其是当前的光伏建设成本与海宁发展分布式光伏初期相比，已经有了显著的下降，可在一定程度上弥补去补贴带来的经济性影响。

分散式风电开发潜力

中国陆上风电装机密度远低于丹麦和德国。目前德国的风电装机密度是中国的7倍，是江浙沪地区的3倍（见图22）。随着低风速风电技术的进步，可开发风能资源范围从6米/秒以上扩大到5米/秒以上，中国东南部地区具有经济开发价值的风能资源达到10亿千瓦以上，目前开发量不到其中的十分之一^{xvi}。

分散式风电的可开发量主要受到风资源、土地可用性等因素的影响和制约。目前对分散式风电开发潜力的评估主要基于风电开发企业采用的微观选址模型，对一定区域内风电项目的技术和经济可开发量进行模拟。此外，通过分散式风电主要应用场景集成，以及参照单位面积装机水平，也可进行粗略估算。本研究采用三种测算方法对江浙沪地区分散式风电发展潜力进行评估。这三种方法各有其局限性，但可以粗略相互校

核，对判断分散式风电的总体潜力仍是有参考价值的。

方法一：技术可开发量

风资源测算利用远景集团格林威治测风系统，采用100米分辨率的风资源图谱，应用全国高程数据库、动力模型与实测风资源数据，建立从80米到140米高度的风资源图谱。采用当前适用于长三角地区的风机机型，自动匹配合适的塔筒高度，筛选出技术上可行的容量并得到具体的风机点位。

行政区域内的土地利用类型包括农用地（含耕地、园地、林地、牧草地和其他农用地）、建设用地（含城镇建设用地、工矿用地、农村居民点用地、交通用地、水利设施用地、特殊用地、盐田）和未利用地（含水域、滩涂、沼泽、自然保留地）。在土地利用的维度上，根据两省一市各类土地面积，扣减水域面积、各级公路占地面积、绿地、景区和保护区、建筑及已开发的风场占地，得到技术可利用面积。如果仅按照工矿用地和盐田等政策明确可用于风电项目开发的土地测算，江浙沪地区分散式风电开发潜力只有102万千瓦（见图23）。如果土地利用政策不采取

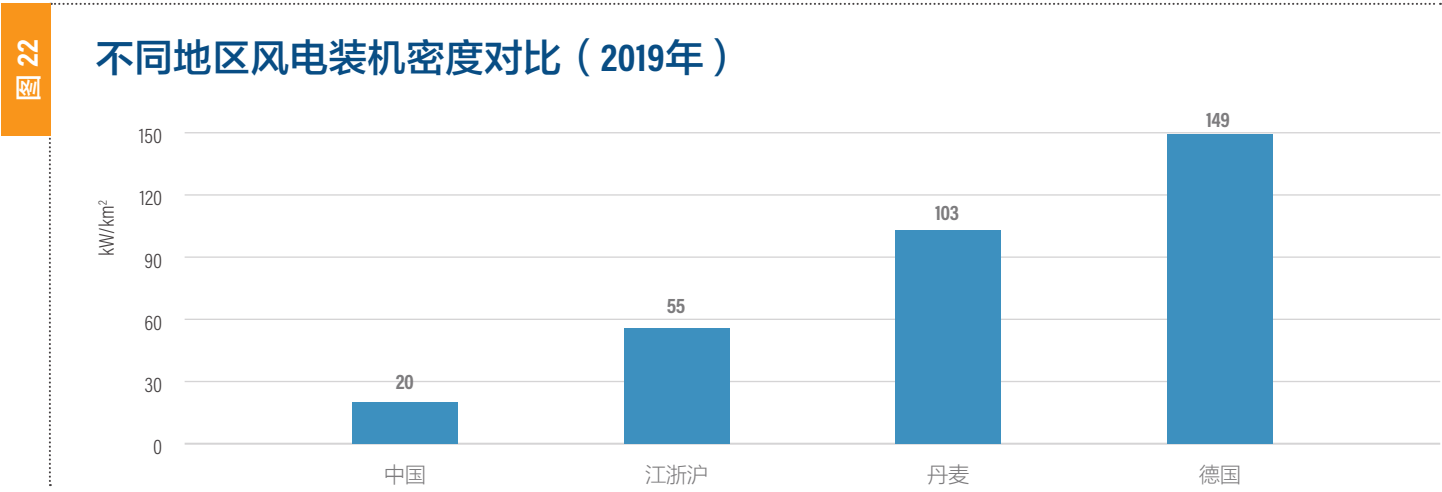


表 5

江浙沪地区分散式风电装机潜力（技术可开发）

地区	技术可利用土地面积（公顷）	技术可开发量（万千瓦）
上海	404113	57
江苏	7649139	6876
浙江	8906163	1335
合计		8268

注：浙江由于山地较多，尽管技术可利用土地面积大于江苏，技术可开发量仍远远小于江苏。

表 6

江浙沪地区园区和村庄数量

地区	园区数量（个） ^{xix}	100亩以上园区数量（个）	村庄数量（个） ^{xxii}
上海	3303	196	1590
江苏	7633	603	14477
浙江	6158	354	27568
共计	17094	1153	43635

表 7

江浙沪地区分散式风电装机潜力（参考德国）

地区	面积（平方千米）	装机潜力（万千瓦）
上海	6340	94
江苏	107200	1596
浙江	105500	1571
合计	219040	3261

“一刀切”的方式，按照精细化管理，为分散式风电开发预留空间，综合考虑风资源、生态保护和城市限高，江浙沪分散式风电发展潜力可达到8268万千瓦（见表5）。

方法二：农村、园区情景集成

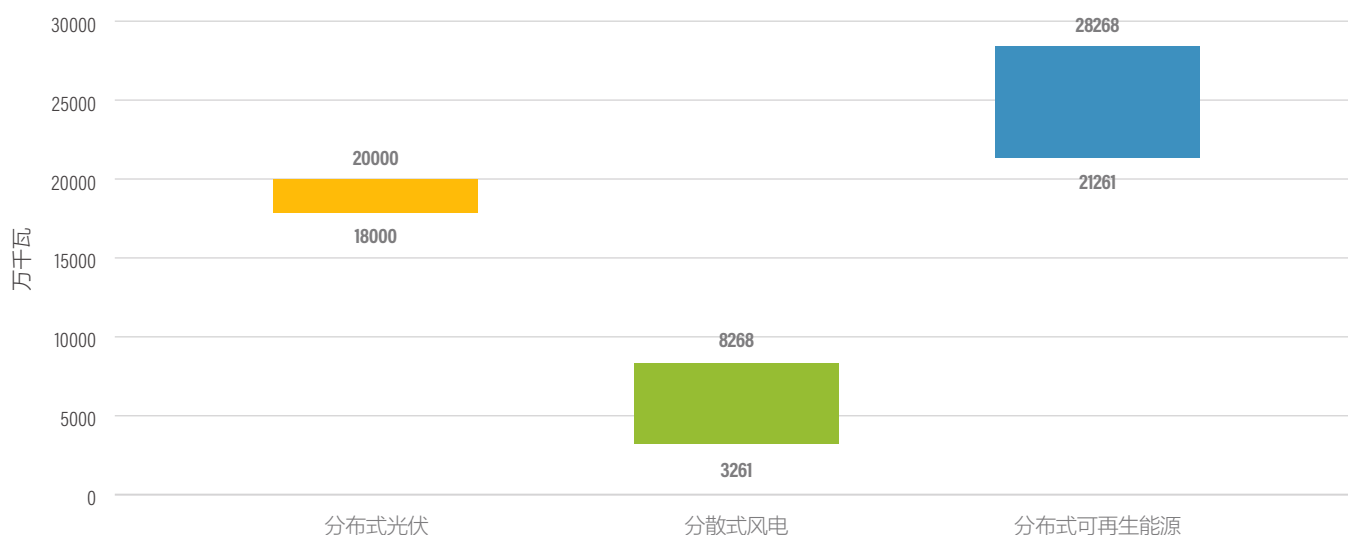
分散式风电在农村地区、园区（含港口）具有较大的发展空间。本研究根据江浙沪地区的园区数量（重点考虑面积为100亩以上的园区）和村庄数量，对分散式风电开发的潜力做了初步评估。对于园区，根据专家建议，假定每个面积为100亩以上的园区安装一台风机；对于上海和江苏的农村，平均每两个村庄安装一台风机；对于浙江的农村，考虑山地的影响，设定平均每三

个村庄安装一台风机；单台风机功率为2.5兆瓦（目前的主流机型）。江浙沪地区园区和村庄数量见表6。根据以上假设，估算得出农村风电装机潜力为4303万千瓦，园区装机潜力为288万千瓦，共计4591万千瓦。

方法三：参考德国装机密度

用德国的装机密度来比照，也是国内风电行业较为常用的挖潜方法。这种方法尽管不是非常精确，但可以在一定程度上提供粗略的参考。德国国土面积为35.7万平方千米，陆上风电装机5320万千瓦，装机密度约为149千瓦/平方千米，若简单类比，按照德国装机密度推算，江浙沪地区分散式风电装机潜力为3261万千瓦（见表7）。

江浙沪分布式清洁能源发展潜力



综合上述测算方法，江浙沪地区未来分散式风电潜力约为3261万~8268万千瓦，加上1.8亿~2亿千瓦分布式光伏，分布式可再生能源开发潜力可达2.1亿~2.8亿千瓦，潜力巨大（见图24）。

分布式电源接入电网的承载力估算

可再生能源开发潜力能在多大程度上被开发出来，还取决于电网的实际承载力。在满足供电设备和线路不过载、系统各项性能参数不超标的条件下，基于现有配电网的规模布局和运行方式，本研究对配电网接纳分布式电源的最大容量进行了初步测算。

大规模分布式电源接入电网后，对配电网的规划和调度运行都会带来影响。为了保障分布式电源与负荷和电网的协调发展，必须基于配电网稳定运行边界和实际运行状态，评估各节点未来可接入的分布式电源容量裕度，进而为分布式电源和配电网的规划、建设提供指导。

评估方法

考虑到分布式电源接入电压等级含35千伏和110千伏，而分布式电源接入容量若超过实际承载力，影响会波及上一电压等级，即220千伏。因此，分布式电源承载力评估主要以220千伏及以下电压等级的配电网为分析对象，基于配电网实际运行拓扑，遵循“分区分层”原则，从总体到局部、从高压到低压，按供电区域和电压等级开展。评估结果为配电网各电压等级母线的可新增装机容量。

分布式电源接入电网的承载力以待评估区域电源装机信息、电源特性数据、电网设备参数、电网历史运行数据、电能质量实测数据、电网安全运行边界数据等为基础开展评估，并充分考虑该区域的地理位置、电网拓扑、运行方式、负荷类型、负荷水平、时间尺度、在建及已批复电源和电网项目等因素。评估流程（见图25）如下：

第一步：明确待评估区域电网范围，描绘待评估区域电网拓扑图。一般来说，评估范围以单台220千伏变压器的供电区域划分，评估对象包括该区域内所有35~220千伏等级的变压器、35~110千伏等级的线路、10~220千伏等级的母线。

第二步：进行数据收集，判断待评估区域是否发生分布式电源向220千伏及以上电网反送电（春节、国庆等特殊法定节假日除外），即该区域分布式电源总出力是否大于用电负荷，若反送则该评估区域各电压等级分布式电源承载力等级为红色。

第三步：按照电压等级从高至低分层进行评估。基于系统数据、设备参数、运行数据，统计当前层级各母线短路电流、电压偏差的现状值和谐波实测值，并参照各项限值进行校核，若校核不通过，则该电压等级及以下区域电网的分布式电源承载力等级为红色。

第四步：在待评估区域电网正常运行方式下，开展热稳定评估，确定当前层级变压器和线路的反向负载率及可新增分布式电

源容量。统计评估周期内反向负载率的最大值 $\lambda_{\max}$ ，若 $\lambda_{\max}>80\%$ ，则该电压等级及以下区域电网的分布式电源承载力等级为红色。

第五步：根据第四步得出的可新增分布式电源容量，计算并校核短路电流和电压偏差。

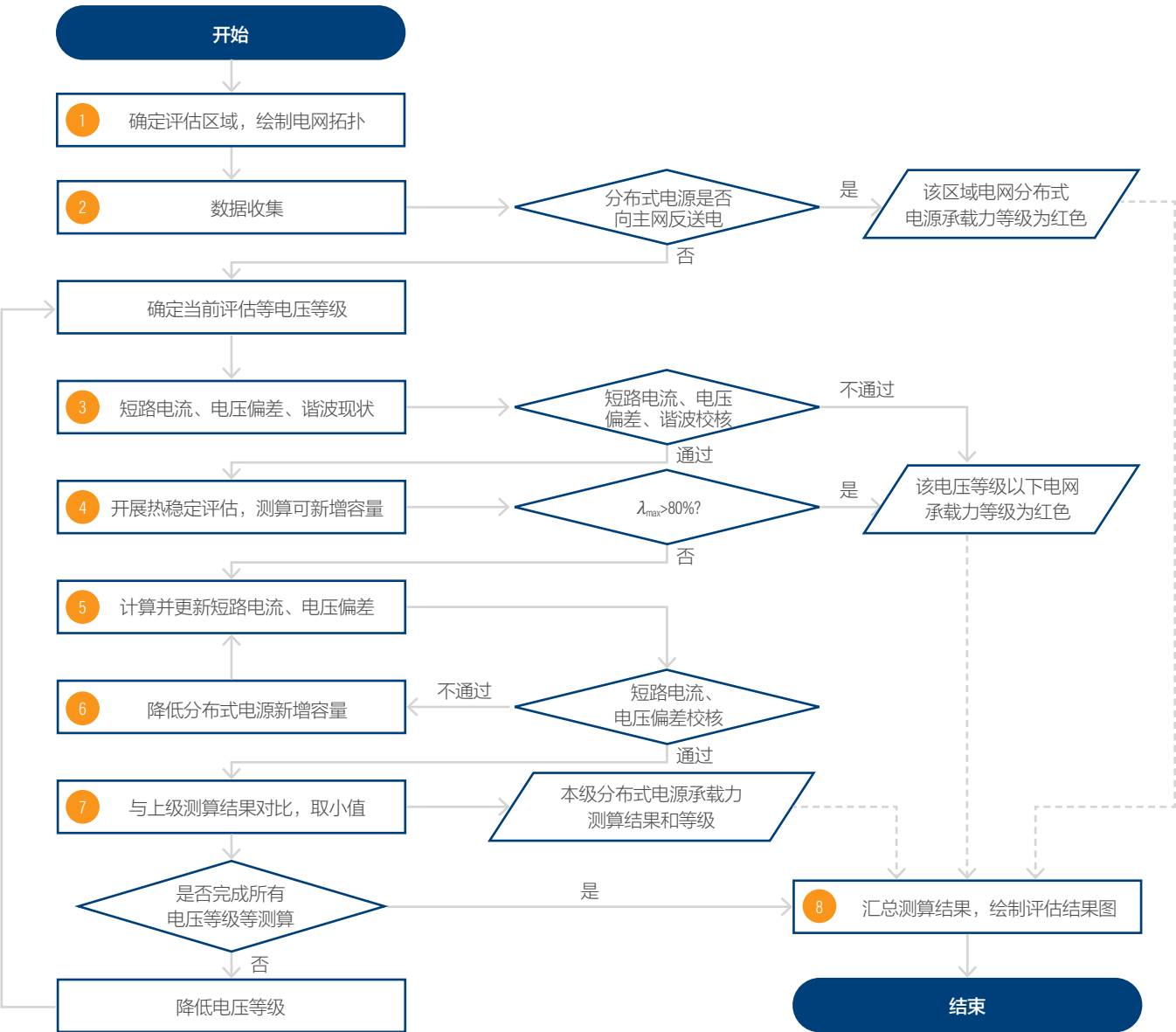
第六步：若第五步校核不通过，逐步降低可新增分布式电源的容量，重复第五步，直到校核通过，通过校核的容量即为待评估电网当前层级的分布式电源承载力。

第七步：完成当前电压等级电网的测算后，依据拓扑连接关系，将测算结果与上一电压等级的测算结果进行比较，取两者间较小值作为本级评估结果。然后，逐渐降低电压等级，重复第三步至第七步，直至完成待评估电网所有电压等级的测算。

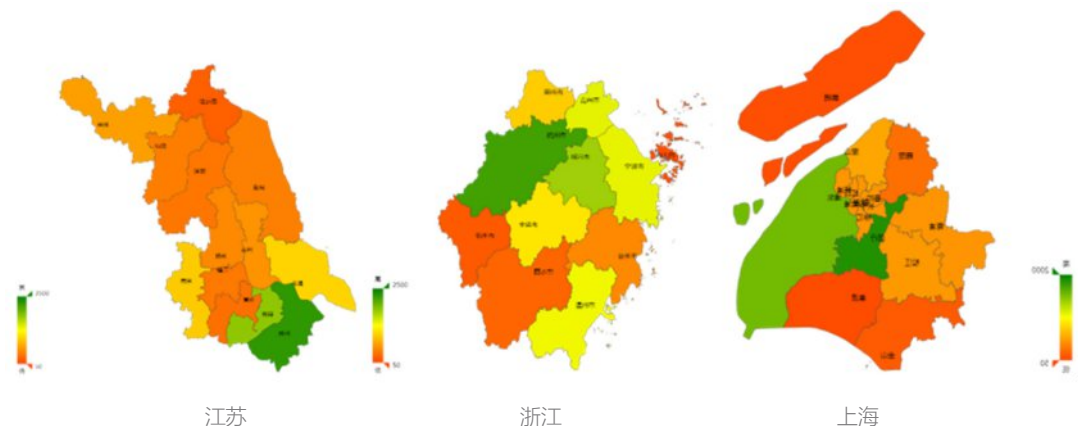
第八步：汇总各级测算结果，划分待评估电网分布式电源承载力等级，列出各级母线的分布式电源承载力裕度，最终依据电网拓扑绘制该区域的分布式电源承载力结果图。

图 25

分布式电源承载力测算流程图



江浙沪分布式电源接入电网承载力分布图



评估结果

根据上述评估方法，综合考虑江苏、浙江和上海的现有负荷情况、电源装机容量、电网架构等因素，测算出该地区分布式电源接入电网的承载力为3089万千瓦，其中江苏1367万千瓦，浙江1116万千瓦，上海606万千瓦（见图26）。

评估结果分析

从评估结果来看，截至2019年底，江浙沪地区电网的分布式电源可装机总量为分布式电源存量（1693万千瓦）和可新增裕度（3089万千瓦）之和，总计4782万千瓦，约占该地区分布式光伏开发潜力（1.8亿~2亿千瓦）的1/4，即以2019年为水平年测算的分布式电源承载力距开发潜力还有较大差距。

值得指出的是，电网承载力的评估是基于现有的负荷需求、网架结构以及运行方式等边界条件开展的，并未考虑未来负荷增长、电网设施新建和扩容、配网侧灵活性提升和运行优化的空间。首先，负荷水平、电网设施容量规模是影响分布式电源承载力的关键因素，承载力大小与负荷大小、电网设施容量限值成正比，未来一定时期内，负荷和电网规模必然呈增长趋势，承载力还有较大的增长空间。其次，分布式可再生能源出力与用电负荷的同步性也是影响承载力的重要因素，分布式电源就近消纳是从功率供需平衡层面来体现的，并非电量平衡层面，全年中少量的分布式电源出力高渗透率时段是限制承载力大小的瓶颈时段，如果通过增加储能、需求侧管理等方式，也可以增加电网承载力。另外，我国配电网主要为辐射状拓扑结构，分布式电源的接入必须满足故障检修、计划检修等运行方式下的配网安全性要求，承载力大小也因此受限。所以，承载力评估需要定期开展，评估周期可与电网年度运行方式分

析、电网规划同步。对于负荷、电源、网架发生重大变化的配电网，可按需适时开展评估工作，对于承载力较弱的区域，应缩短评估周期。

提升分布式电源承载力的路径

针对影响电网承载分布式电源能力的关键因素，可通过以下几个措施进行提升：

- 开展电网设施改造，对配电网一次设备进行改造升级，可有效提高其电流耐受能力，进而提高分布式电源承载力。
- 配置配网侧储能，储能作为一种灵活性资源参与配电网的功率供需平衡调节，可有效降低分布式电源出力高峰时段的功率渗透率，保证运行约束不超限。
- 推进需求侧响应建设，基于电价或激励的需求侧响应可满足配电网灵活性的平移性和宽幅性要求，能够有效增加分布式电源出力高峰时段的净负荷，降低运行约束的超限风险。
- 配电网拓扑优化，通过网络拓扑优化来调整潮流分布，可保证系统安全运行指标维持在合理范围内，进而提升分布式电源的承载力。

长三角地区分布式能源发展愿景

长三角地区未来能源发展展望

未来能源需求增速放缓，电力需求仍具有较大增长空间

2000年以来，长三角地区一次能源消费增长总体态势与全国相似，前期经历了快速增长阶段，年均增速8.5%，2013年以

后进入缓慢增长期，年均增速2.1%。上海一次能源消费已进入低速增长阶段，浙江和江苏保持中低速增长。2013—2018年期间，上海一次能源消费年均增速只有1.0%，江苏年均增速1.9%，浙江仍保持年均3.1%的增长态势。电力消费仍保持较快增长，2000—2013年期间，电力消费年均增速高达11.9%，2013年以后，电力消费增速已经从两位数高速增长明显回落到中速增长，2013—2018年期间年均增速4.5%。

长三角地区经济发展水平已经接近发达经济形态，超过世界银行划定的高收入国家门槛。城镇化水平比全国平均水平高10%以上。从三次产业结构看，上海、江苏、浙江已经进入了以服务业为主的发展阶段。

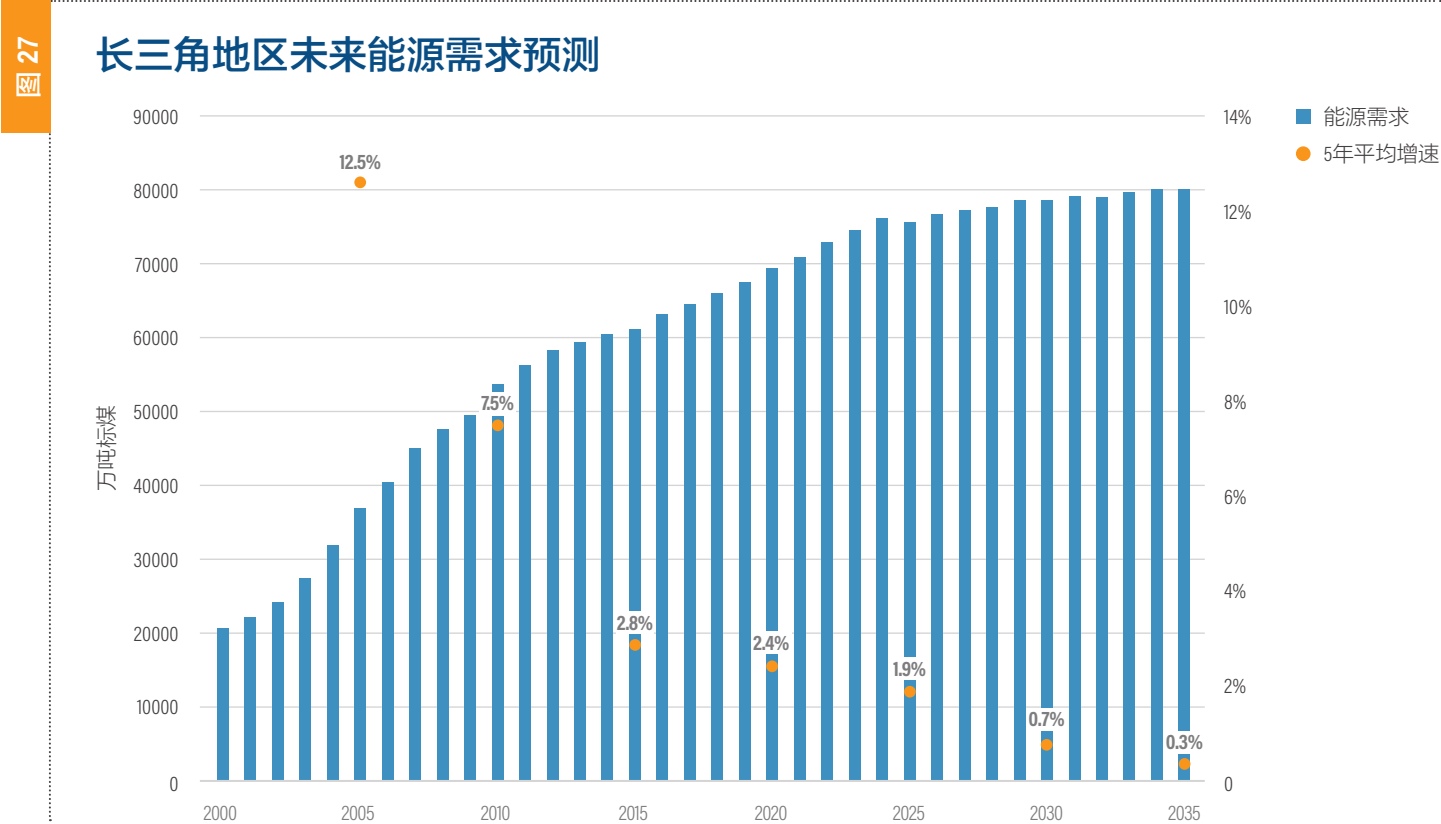
国家长三角一体化发展战略将要打造世界级创新平台和增长极，加快推动长三角地区产业转型升级，持续增强长三角地区对全国经济发展的带动力。长三角地区将继续领先全国发展，率先探索后工业化社会发展模式。第三产业占比将持续提升，农业和工业占比进一步缩减。随着长三角一体化上升为国家战略，人才集聚效应增强，转型升级步伐加快，但也面临要素成本上升、经济增长承压、产业外迁、环保压力加大等挑战。随着中西部省会

城市强势崛起，外迁劳动力回流，长三角地区人口将呈现先增后减趋势。

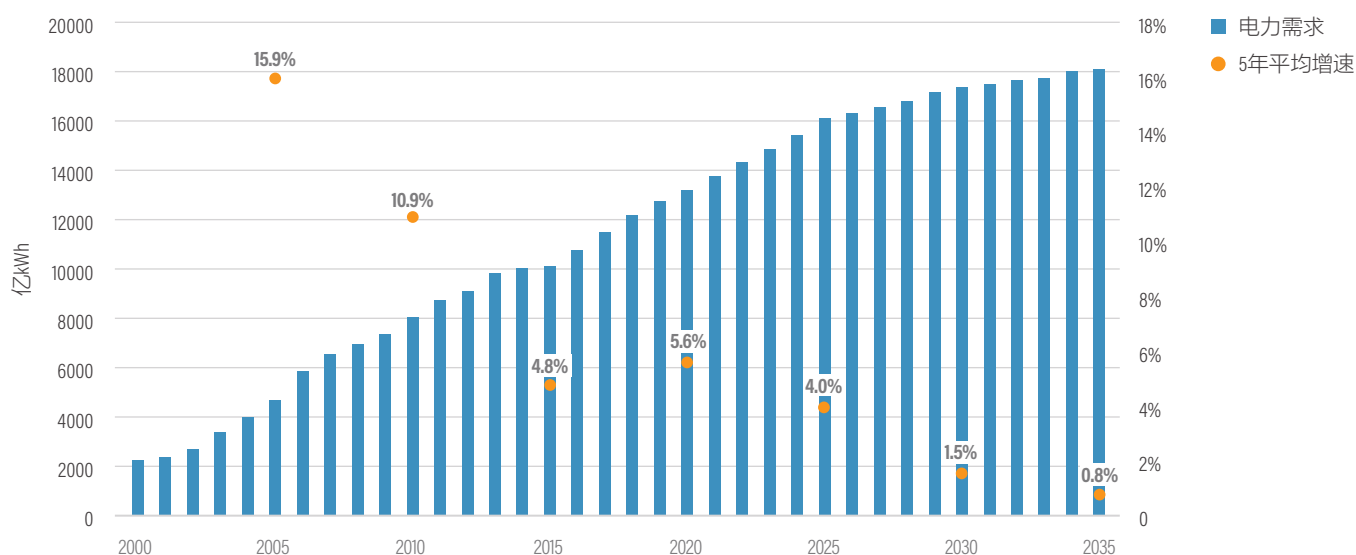
课题组利用多元线性回归模型和向量自回归模型，在考虑经济社会发展、人口总量变动、产业结构优化等宏观因素下，以及对长三角两省一市的能源消费弹性系数、单位产值能耗、人均能耗分别进行模拟分析，利用向量自回归（Vector Auto Regression）模型对两省一市未来中长期能源需求进行了预测。

从一次能源消费来看，预计“十四五”期间一次能源消费年均增长率为2.0%，“十五五”将进入增速低于1%的饱和增长期。2025年一次能源消费量达到7.5亿吨标准煤，2030年达到7.8亿吨标准煤，2035年达到约8亿吨标准煤。2035年比2018年增长21%，净增能源需求1.4亿吨标准煤（见图27）。

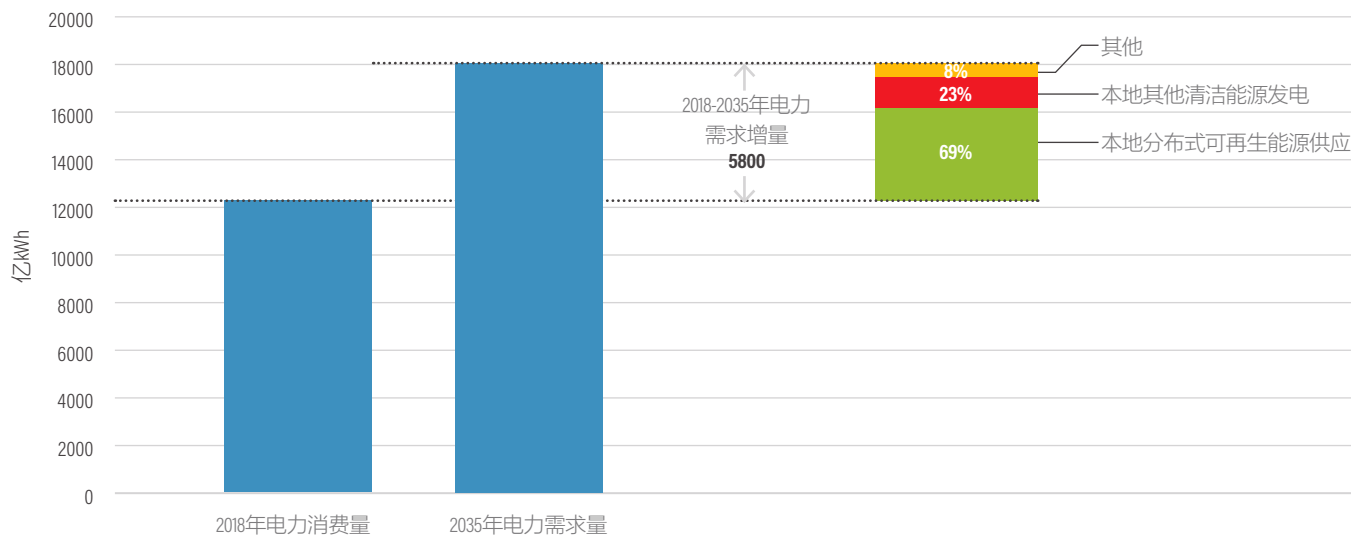
从电力需求来看，随着长三角地区科创产业、先进制造业、数字经济产业等新经济产业的快速发展和传统产业的转型升级，电气化步伐持续加快。虽然电力消费增速也将逐渐放缓，但仍高于能源消费增速，电力消费的饱和增长期要比能源消费滞后5—10年左右。预计“十四五”期间长三角地区电力消费年均增速



长三角地区未来电力需求预测



长三角地区电力需求增长及非化石能源发电供应



为4.0%，“十五五”期间下降到1.5%，“十六五”期间下降至1%左右。到2025年，长三角地区电力需求总量将达到1.6万亿千瓦时，2030年达到1.74万亿千瓦时，2035年达到1.8万亿千瓦时。2035年电力需求将比2018年增长近50%，净增5800亿千瓦时（见图28）。

充分利用好本地非化石能源资源，可实现清洁电力从身边来

长三角地区分布式光伏发展潜力1.8亿~2亿千瓦，分散式风电发展潜力3261万~8268万千瓦，发电量可以满足2035年期间新增电力需求的48%~69%，如果再考虑新增海上风电、核电、垃圾发电等其他清洁能源，未来长三角地区新增电力需求可主要由本地非化石能源提供，实现清洁电力从身边来的愿景（见图29）。

分布式可再生能源发展愿景

综合考虑国家能源发展战略要求、政策趋势以及体制机制突破等因素，结合目前发展现状，以2019年为基准年，以2025年、2035年为目标年，分两个阶段，对江浙沪地区分布式可再生能源发展前景进行描绘。

2019—2025年：突破分布式可再生能源发展的主要障碍，为规模化发展打下良好基础（战略阶段一）

这一阶段，随着可再生能源发电技术成本进一步下降，风电、光伏等技术有望在“十四五”初期实现平价甚至低于燃煤发电上网电价²⁰，经济性得到显著提升。到2025年，江浙沪地区分布式可再生能源发电装机规模达到5000万~7000万千瓦，成为满足本地新增需求的主力电源。

这一时期，首先应尽可能地挖掘现有电网的消纳潜力，重点突破市场化交易、土地利用、项目核准等体制机制障碍，扩大分布式可再生能源的开发范围和市场空间，保证在现有的电网承载力范围内充分开发分布式可再生能源，装机规模达到5000万千瓦。在此基础上，应加强配电网建设，满足分布式电源大规模接入的需求，以及各类用电设施和用户端的多元化需求。同时，加快储能技术应用，充分挖掘电动汽车、虚拟电厂等需求侧资源。通过推动

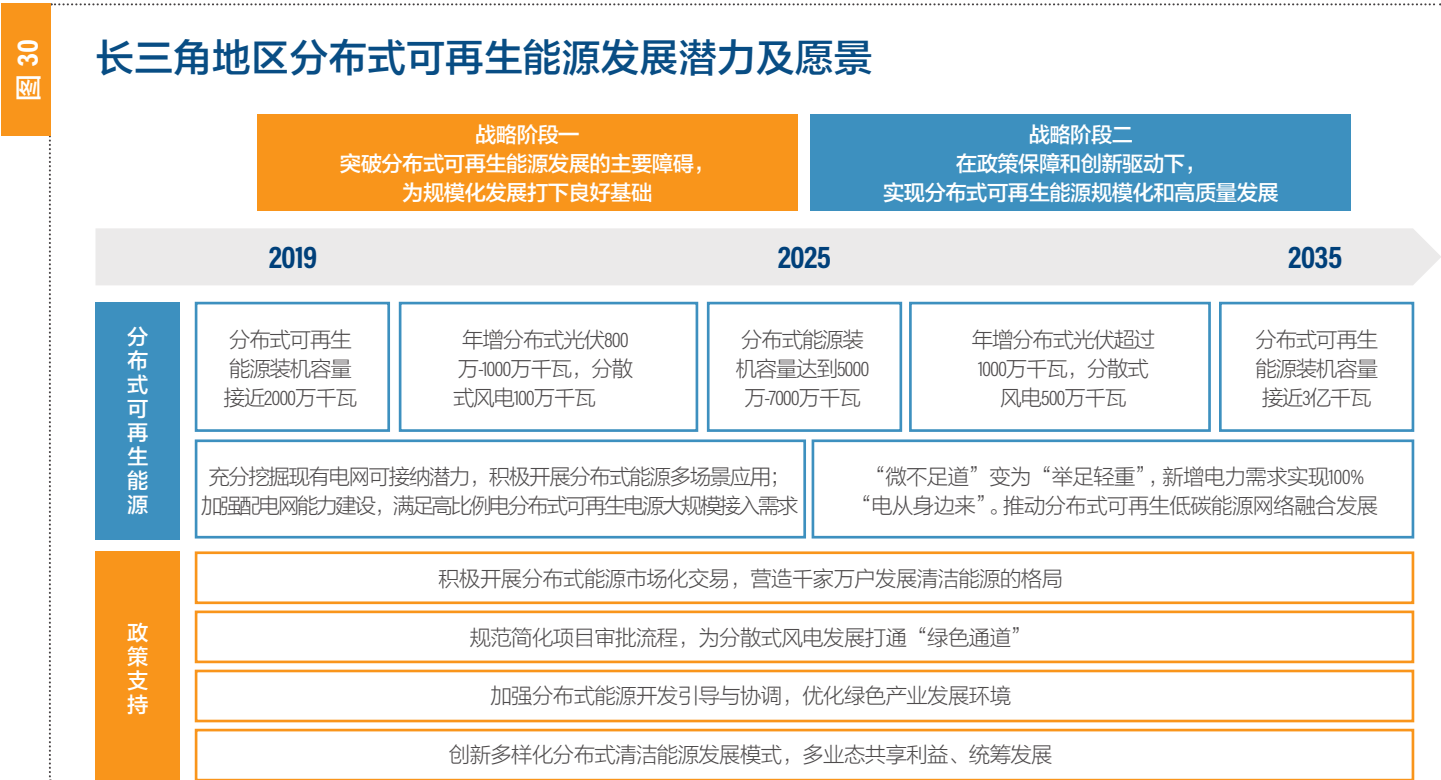
“源-网-荷-储”协调发展，在支撑高比例分布式能源并网的同时，有效提升电网运行安全性和可靠性，为实现更大规模地开发利用分布式可再生能源创造条件。争取每年新增分布式光伏800万~1000万千瓦、分散式风电100万千瓦左右。到2025年，长三角地区分布式可再生能源装机规模达到7000万千瓦。

2025—2035年：在政策保障和创新驱动下，实现分布式能源规模化 and 高质量发展（战略阶段二）

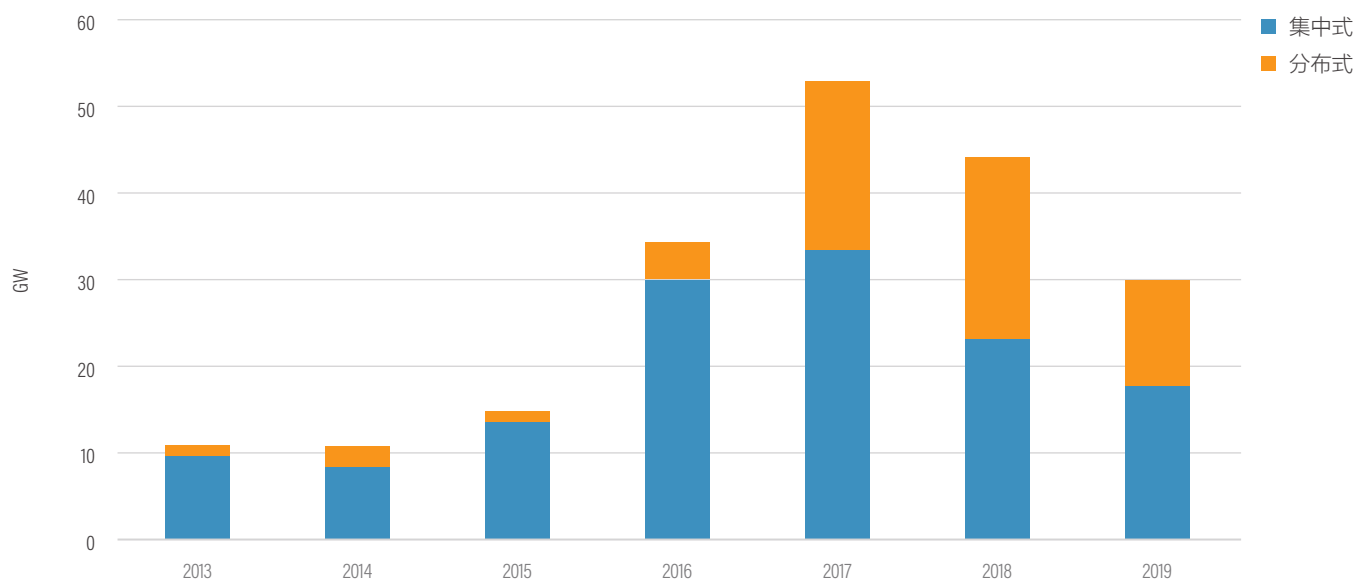
这一阶段，分布式能源发展环境大幅改观，规模化和高质量发展具备了良好的发展基础。一是电力市场体制机制健全完善，一系列政策障碍得以破除。二是配电网能力明显提升，电力系统更加智能灵活，适应高比例分布式电源接入的能力显著增强。三是商业模式也日渐成熟，光伏与建筑、交通基础设施一体化发展的市场规模逐步扩大，电动汽车、虚拟电厂等需求侧资源充分释放，市场化标准下的“源-网-荷-储”协同作用进一步凸显。

展望2025—2035年，江浙沪地区每年新增分布式光伏超过1000万千瓦、分散式风电超过500万千瓦，本地新增分布式能源发电完全可以满足新增电力的需要，新增电力需求实现100%“电从身边来”。到2035年，分布式发电装机规模争取接近3亿千瓦。

长三角地区分布式可再生能源发展潜力及愿景如图30所示。



历年全国光伏新增装机容量



长三角地区分布式能源发展面临的问题挑战和政策建议

问题挑战

目前，长三角地区分布式能源发展虽然已经取得了一些成就，但从项目调研、相关方座谈、专家访谈等多渠道了解到的情况来看，开发规模与实际潜力相比还远远不够。无论是分布式光伏还是分散式风电，都面临着一些共性、个性的问题，发展已出现放缓迹象，诸多制约因素亟待破解。

分布式光伏稳定性收益难以保障

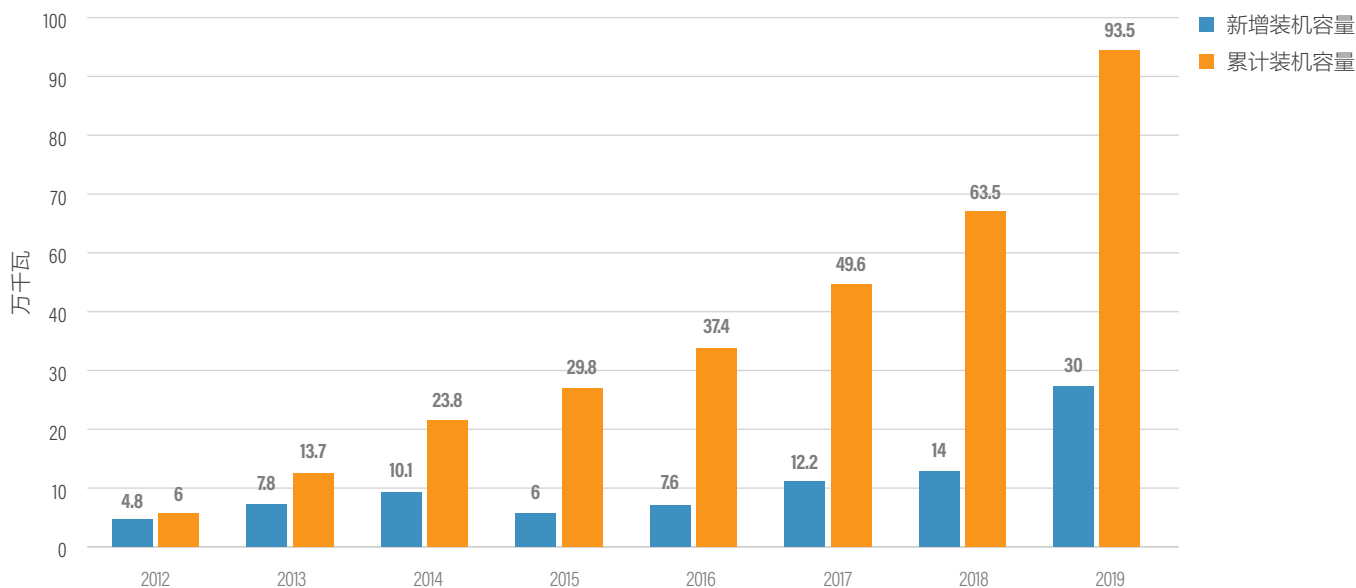
分布式光伏经济性难题长期存在，新形势下发展困局更为明显。一是随着补贴的快速下降直至退出，分布式光伏项目现金流的稳定性受到很大影响，今后的项目收入将主要来源于用电户的电费。二是用电户经营状况不确定性较大，难以保证自发自用电量，开发公司向用电户收取电费也存在一定难度，项目收益的稳定性难以保证。三是这种依赖用电户现金流的商业模式导致分布式光伏项目风险与地面电站不同，用电户的信用在很大程度上影响分布式光伏的融资。用电户可能减少用电、可能倒闭，这些都会增加项目的风险。目前，银行基本上不提供分布式光伏的融资服务，也缺乏资产证券化等融资手段，分布式光伏项目主要由融资租赁机构提供项目融资，通常要求用电户经营稳定、自发自用比例高，但融资成本较高，融资利

率一般在7%左右，并且周期较短。这些困难在分布式光伏发展过程中始终没有得到解决，但由于成本急剧下降，叠加补贴政策，这些矛盾和问题被新的利润空间所掩盖，并没有充分暴露。目前，除了去补贴的影响，优质屋顶、稳定业主也越来越少，投资风险、不确定性变得越来越大，开发企业的积极性大不如前，融资难、收费难等问题也越来越凸显。2019年全国分布式光伏新增装机容量仅1220万千瓦，较2018年下降40%左右（见图31）；江浙沪新增293万千瓦，是2018年新增装机的56%²¹，发展形势不容乐观。

分布式市场化交易难以落地

由于风电、光伏等存在波动性和不稳定性，导致出力 and 负荷难以准确匹配，且上网电价相对较低，使得经济性大打折扣。如果允许项目通过配电网将电力直接销售给临近用户，可以有效扩大交易范围，拓宽分布式项目售电渠道，提高项目经济性，但目前分布式市场化交易试点难以推进。继2017年国家发展和改革委员会和国家能源局联合下发《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》之后，江苏省于2019年12月出台了全国首个地方分布式市场化交易规则，随后明确了省内7个试点项目。然而由于缺乏完善的电力市场定价机制及成熟的商业模式，各类电力用户承担着较为复杂的交叉补贴，主要相关方的责、权、利分配仍未达成一致，过网费的核算标准尚不清晰等原因，试点交易尚未落地。分布式可再生能源无法充分发挥就近消纳的优势，进一步发展面临着严峻挑战。

我国分散式风电发展趋势



分散式风电发展步履维艰

自2011年国家能源局印发《分散式接入风电项目开发建设指导意见》以来，国家相继出台多个政策支持分散式风电发展，至今也有超过19个省份和地区出台了分散式风电政策和规划，但在零敲碎打的发展模式下，行业发展一直处于不温不火的状态，总体开发规模较小。截至2019年底，中国分散式风电装机规模仅为93.5万千瓦（见图32）^{xxiii}。

这其中的主要障碍在于分散式风电的审批流程过于繁琐冗长。一是和集中式风电基地相比，分散式风电项目单体规模小，总投资较低，但在项目核准、土地审批、环保评估等方面仍需同等的核准流程。二是很多地方没有真正落实项目核准承诺制，土地审批手续也繁杂，缺乏针对噪声、景观、鸟类影响等的环保评估标准，前置性审核材料不仅没有减少，而且比集中式项目前期工作更加复杂。三是有的地方配网建设也跟不上，大大提高了分散式风电的开发门槛和收益不确定性。四是部分地区的政府主管部门对风电发展形势、技术进步等不熟悉，担忧风电建设会对城市规划和城市发展产生不利影响，主观接受度不高，甚至出现过不同层级反复批示的情况。

政策建议

基于上述体制机制、市场环境、行业建设等层面的问题和障碍，结合长三角地区的能源总量控制、节能减排考核等要求，综合考虑长三角地区经济和能源发展形势，课题组建议，在

“十四五”时期，将发展分布式能源作为长三角地区能源高质量发展的重要方向，探索分布式清洁能源发展路径，助力打造长三角绿色能源生态圈。

将市场化交易作为推进分布式可再生能源发展的主要抓手

分布式可再生能源之所以存在融资难、收费难等问题，根本上就在于稳定性收益无法得到保障。目前，分布式电源只能按照“自发自用、余电上网”的模式，项目能否盈利取决于所在屋顶业主的经营效益。在补贴退坡后，发电上网经济性大大降低，“有负荷没屋顶、有屋顶没负荷”的错位局面更加凸显。推动市场化交易是解决这一问题、充分挖掘分布式能源潜力的最关键措施。

“十四五”期间，应在政策层面上进一步鼓励开展市场化交易，加快完善分布式发电市场化交易机制，理顺利益分配方式，明确合理的过网费收取标准，通过减免政策性交叉补贴，有效扩大分布式能源应用场景；结合区块链技术鼓励售电侧的就近直接交易，实现“隔墙售电”，推动分布式能源由“单站模式”向“微网模式”发展，营造千家万户开发利用清洁能源的格局。

进一步简化项目审批流程，为分散式风电发展打通“绿色通道”

针对分散式风电项目小、散的特点，亟须创新项目核准模式，加快政策松绑，主要是推进分散式风电与微电网系统的融

合，加强能源、土地等管理部门间的统筹协调，建立简便、高效、规范的核准管理工作机制。

一是按照“集中规划、批量核准”的原则，鼓励探索以县域、园区及项目群为单位进行打包核准新模式，积极落实项目核准承诺制，推动项目核准由事前审批转为事后监管，有效简化前期手续，实现“一窗式受理、一站式核准”，并与电网有效衔接，建立与电网接入申请、并网调试、电费结算等相结合的服务体系，避免重复性手续要求，达到过去几年分布式光伏的项目简化程度。二是自然资源部门应为分散式风电预留空间，鼓励充分利用各类园区空地及集体用地开发分布式可再生能源项目。充分考虑到分散式风电开发的实际约束和困难，在不破坏土地使用条件、严守生态红线的前提下，适度放开部分土地性质征用准则，为分散式风电发展提供足够的政策环境和绿色空间。三是生态环境部门应制定噪声、景观、鸟类迁徙等方面的环保评估标准，明确项目环评要求，让分散式风电项目开发企业有理可依、有据可循。四是加强公众宣传力度。建议自然资源、生态环境等相关部门组织开展分散式风电开发情景适用性研究，明确分散式风电对土地使用、景观融合、生态环境等方面的影响，正确引导公众社会对分散式风电开发建设的认知。

创新多样化分布式清洁能源发展模式

对分布式光伏而言，应结合设施农业、高端农业、水产养殖等，积极发展农光互补、渔光互补等“光伏+”产业；对存量居民屋顶，建议开展试点，探索形成风险共担、收益共享的社区光伏机制模式，鼓励公众参与社区分布式能源项目，解决《物权法》等对发展分布式光伏的阻碍；对数据中心、工业园区等新建厂区，建议由管委会对园区内所有屋顶的规划、建设及使用实行统一要求，确保屋顶资源有效利用，减少分布式光伏“锁定用户”的风险，提高项目收益率，保障投资方经济效益。同时，还需要完善分布式光伏投融资市场信用体系和项目风险评估机制，为创新融资模式提供条件。

对分散式风电而言，应将分散式风电开发纳入园区规划、新农村建设范畴，并加强“土地使用、景观融合、经济效益”等方面的科学研究和舆论引导。积极探索分散式风电带动园区、农村经济发展新模式。在工业园区、新农村等地区，鼓励园区空地、田间地头等各类空闲土地入股开发分散式风电项目，推动“一分地”风电带动周边社区、园区等业态共享利益、统筹发展。通过土地入股，推动农村集体用地流转，将风电项目建设与发展农村经济、改善民生工程紧密结合，建立更广泛的利益共同体，带动农村地区经济社会发展。

注释

1. 可再生能源指的是在自然界可以循环再生的能源，通常包括太阳能、风能、生物质能、地热能、小水电等。
2. 由于安徽省的经济发展水平与江苏、浙江和上海存在较大差距，能源供给特征也有明显差异，因此本研究仅针对江苏、浙江和上海。
3. 根据国家统计局2019年数据计算。
4. 根据国家统计局2018年数据计算。
5. 按照长三角地区分布式光伏发电平均利用小时数为1000进行估算，2019年分布式光伏发电量仅占该地区用电量的1.35%。
6. 根据能源局发布的历年光伏发电并网运行情况整理。
7. 数据来源：<https://www.iea.org/data-and-statistics?country=DENMARK&fuel=Energy%20supply&indicator=Electricity%20generation%20by%20source>。
8. 来源：国家可再生能源中心。
9. 未考虑格陵兰岛等丹麦海外领地。
10. 根据IRENA最新统计数据计算。
11. 2018年，中国光伏发电平均利用小时数为1115小时，在资源条件较好的蒙西地区，这一数字可达1617小时。
12. 来源：GIZ。
13. 根据各地公开的规划整理。
14. “交叉补贴”指的是因商品定价造成的一部分用户对另外一部分用户的补贴。比如，在电力系统中，工业用户用电负荷相对大而稳定，电压等级高，电力传输线损少；而居民用户用电负荷不稳定，电压等级低，传输线损大，按照成本加合理收益的原则，居民用电价格应高于工业用电价格。但在我国，出于保障民生等方面的考虑，对居民、农业等部分类别的用户实施优惠电价，造成了电价中的交叉补贴问题。
15. 分布式电源接入电网承载力指的是在满足供电设备和线路不过载、系统各项性能参数不超标的条件下，配电网接纳分布式电源的最大容量。
16. 除了农业大棚，长三角地区还有一部分村级农光互补项目，通常在1MW以下。
17. 调研数据，嘉兴市光伏行业协会。
18. 数据来源：两省一市统计年鉴。
19. 数据来源：前瞻产业研究院。
20. 标杆电价是国家在经营期电价的基础上，对各类新建发电项目实行按区域或省平均成本统一定价的电价政策。
21. 数据来源：国家能源局。

参考文献

- i. CLIMATE WATCH. Historical GHG Emissions. <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=sector&chartType=area>.
- ii. CNREC, Distributed Wind and PV in Denmark and Germany.
- iii. 国家统计局. 中国电力年鉴2018[J]. 1993-. 北京: 中国电力出版社, 1993-.
- iv. 国家统计局. 中国能源统计年鉴2018[J]. 1986-. 北京: 中国统计出版社有限公司. 1986-.
- v. 国家能源局. 2019年度全国可再生能源电力发展监测评价报告[R/OL]. (2020-05-06).
- vi. 国家能源局. 2019年光伏发电并网运行情况 [R/OL]. (2020-02-28).
- vii. 杨晓亮, 寇玥等. 零碳之路: “十四五” 开启中国绿色发展新篇章. 世界资源研究所, 2020. https://www.wri.org.cn/report/2020/11/accelerating-net-zero-transition-china_CN.
- viii. 来源: IEA Renewables Policies Database.
- ix. The Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMUB). Climate Action Plan 2050: Principles and goals of the German government's climate policy[R/OL]. (2016-11-14).
- x. AMELANG S. APPUNN K etc. Europe's Largest Economy Exits Coal to Reach Climate Goals[P/OL]. (2020-07-03)。
- xi. 来源: IRENA, Renewable Electricity Capacity and Generation Statistics, April 2020.
- xii. 来源: 《德国监管报告2017》。
- xiii. 来源: German Wind Energy Association. Community Wind Power: local energy for local people.
- xiv. SANDID A. German Solar Market Recent Trends and Outlook 2018 [J/OL]. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. (2018-09-17).
- xv. 浙江省政府办公厅. 浙江省人民政府关于推进浙江省百万家庭屋顶光伏工程建设的实施意见. 浙政办发[2016]109号[A/OL]. (2016-09-10).
- xvi. International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Power Generation Costs in 2019 [J/OL]. (2020-07).
- xvii. 全球各国最低的光伏电价, 多国低于2美分/度. 智慧光伏. (2020-07-05).
- xviii. International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Power Generation Costs in 2019 [J/OL]. (2020-07).
- xix. International Energy Agency (IEA). Renewables 2019: Market analysis and forecast from 2019 to 2024[J/OL]. (2019-10).
- xx. JACOBSON M Z.. Evaluation of Nuclear Power as a Proposed Solution to Global Warming, Air Pollution, and Energy Security[M] 2019.
- xxi. 江阴共识: 分散式风电是推动中国能源革命的重要力量. 2019.
- xxii. 中华人民共和国民政部. 中华人民共和国乡镇行政区划简册 2017[J]. 2010-. 北京: 中国统计出版社, 2010.
- xxiii. 中国可再生能源学会风能专业委员会. 中国风电产业地图2019[J].

致谢

在本项目研究过程中，研究团队得到了诸多外部专家的大力支持。包括：中国电力科学研究院新能源研究中心夏俊荣，远景集团方笑菊、王智科，为式（苏州）智能科技有限公司徐立等，在此向他们表示诚挚感谢。

作者感谢以下专家（排名不分先后），他们在本论文的评审过程中提供了宝贵的专业建议和意见：

- 洪博文 国网能源研究院
- 彭 澎 中国新能源电力投融资联盟
- 秦海岩 中国风能协会
- 赵永红 杭州光伏协会
- 陈 晨 世界资源研究所
- 房伟权 世界资源研究所
- 奚文怡 世界资源研究所
- 薛露露 世界资源研究所
- 杨晓亮 世界资源研究所

感谢实习生欧阳沁怡、刘欣雅在文献收集整理过程中提供的帮助，感谢实习生樊子杨在论文评审过程中帮助收集整理评审意见。

最后，感谢能源基金会（美国）北京办事处为本项目提供了资金支持。

课题组成员

- 袁敏，世界资源研究所气候与能源部能源转型项目总监。邮件：min.yuan@wri.org
- 苗红，世界资源研究所一带一路部部门主任，北京代表处项目开发主任，资深能源专家。邮件：hong.miao@wri.org
- 高虎，中国宏观经济研究院能源研究所。邮件：gaoh@eri.org.cn
- 李际，中国宏观经济研究院能源研究所。邮件：lij@eri.org.cn
- 李海，中国宏观经济研究院能源研究所。邮件：lih@eri.org.cn



图片说明

Cover Yuan Min; pg. i Yuan Min.

关于世界资源研究所

世界资源研究所是一家独立的研究机构，其研究工作致力于寻求保护环境、发展经济和改善民生的实际解决方案。

我们的挑战

自然资源构成了经济机遇和人类福祉的基础。但如今，人类正以不可持续的速度消耗着地球的资源，对经济和人类生活构成了威胁。人类的生存离不开清洁的水、丰饶的土地、健康的森林和安全的气候。宜居的城市和清洁的能源对于建设一个可持续的地球至关重要。我们必须在未来十年中应对这些紧迫的全球挑战。

我们的愿景

我们的愿景是通过对自然资源的良好管理以建设公平和繁荣的地球。我们希望推动政府、企业和民众联合开展行动，消除贫困并为全人类维护自然环境。

我们的工作方法

量化

我们从数据入手，进行独立研究，并利用最新技术提出新的观点和建议。我们通过严谨的分析、识别风险，发现机遇，促进明智决策。我们重点研究影响力较强的经济体和新兴经济体，因为它们对可持续发展的未来具有决定意义。

变革

我们利用研究成果影响政府决策、企业战略和民间社会行动。我们在社区、企业和政府部门进行项目测试，以建立有力的证据基础。我们与合作伙伴努力促成改变，减少贫困，加强社会建设，并尽力争取卓越而长久的成果。

推广

我们志向远大。一旦方法经过测试，我们就与合作伙伴共同采纳，并在区域或全球范围进行推广。我们通过与决策者交流，实施想法并提升影响力。我们衡量成功的标准是，政府和企业的行动能否改善人们的生活，维护健康的环境。

世界资源研究所（WRI）出版物，皆为针对公众关注问题而开展的适时性学术性研究。世界资源研究所承担筛选研究课题的责任，并负责保证作者及相关人员的研究自由，同时积极征求和回应咨询团队及评审专家的指导意见。若无特别声明，出版物中陈述观点的解释权及研究成果均由其作者专属所有。